

FABRÍZIA GIOPPO NUNES

**LEVANTAMENTO DE ÁREAS DE RISCOS A PARTIR DA  
DINÂMICA GEOAMBIENTAL DAS ENCOSTAS  
DA SERRA DO MAR NO PARANÁ**

Dissertação apresentada como requisito parcial  
à obtenção do grau de Mestre. Curso de Pós-  
Graduação em Geologia - Universidade Federal  
do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Alberto Pio Fiori

Co-orientadores:

Prof. Dr. Naldy Emerson Canali

Prof. Dr. Paulo Cesar Soares

CURITIBA

2002

# TERMO DE APROVAÇÃO

FABRIZIA GIOPPO NUNES

“ LEVANTAMENTO DE ÁREAS DE RISCO A PARTIR DA DINÂMICA GEOAMBIENTAIS DAS ENCOSTAS DA SERRA DO MAR NO PARANÁ”.

Dissertação de mestrado aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Curso de Pós-Graduação em Geologia, área de concentração em Geologia Ambiental, da Universidade Federal do Paraná, pela Comissão formada pelos Professores:



Profa. Dra. Chisato Oka Fiori



Prof. Dr. Edvard Elias de Souza



Prof. Dr. Alberto Pio Fiori  
Presidente

Curitiba, 02 de abril de 2002.

*“Ao mesmo tempo em que recusamos todo e qualquer projeto globalizante, toda espécie de sistema fechado de pensamento, toda espécie de nova utopia, reconhecemos a urgência de uma pesquisa verdadeiramente transdisciplinar em um intercâmbio dinâmico entre as ciências exatas, as ciências humanas, a arte e a tradição. Num certo sentido, esse enfoque transdisciplinar está escrito no nosso próprio cérebro, através da dinâmica entre os seus dois hemisférios. O estudo conjunto da natureza e do imaginário, do universo e do homem, poderia nos aproximar melhor do real e nos permitir enfrentar de forma adequada os diferentes desafios de nossa época.”*

*Declaração de Veneza da UNESCO (1987), item 3.*

## ***Agradecimentos***

*Agradecimento especial ao professor Doutor Alberto Pio Fiori, pela orientação, assistência prestada no desenvolvimento da pesquisa, tornando esta possível e pela grandiosa colaboração no aprofundamento dos meus conhecimentos científicos;*

*A professora Doutora Chisato Oka Fiori, os mais sinceros agradecimentos, pelos conhecimentos geomorfológicos, apoio e introdução à pesquisa científica e também por sua amizade e modelo de profissional;*

*Ao professor Doutor Naldy Emerson Canali, pelo apoio, incentivo a pesquisa e pela transmissão de conhecimentos científicos preliminares da área de estudo, como orientador durante a graduação;*

*Aos colegas do Laboratório do Projeto Pantanal, principalmente nas pessoas de Simone Kozciak, Nicole Borchardt e Antônio C. P. Filho, pela assistência prestada na manipulação de alguns programas computacionais utilizados nesta dissertação;*

*Ao Professor Doutor Elvo Fassbinder, pela iniciativa e organização do curso de Introdução ao Spring na UFPR e ao INPE na pessoa de Lúbia Vinha, por ter ministrado o curso de Introdução ao Spring, que foi de grande utilidade nesta dissertação;*

*Ao Professor Doutor Paulo Cesar Soares, pela ajuda na elaboração do Plano do Projeto;*

*Ao Professor Doutor Eduardo Salamuni, pelo fornecimento do mapa geológico;*

*A colega Doutora Tânia Lúcia Graf de Miranda, pela revisão de texto;*

*Aos professores do departamento de Geologia, que através das disciplinas contribuíram para o meu conhecimento científico;*

*A SANEPAR, na pessoa de Arlineu Ribas e Neiva, pelo empréstimo de fotografias aéreas;*

*A SEMA, nas pessoas de Adilar, Jurandir e Sérgio, pelo fornecimento das Imagens de Satélite no formato digital;*

*A SUDERHSA, na pessoa de Edson Nagashima, pelo fornecimento de dados de pluviosidade;*

*A CAPES, pelo apoio financeiro recebido durante a pesquisa, pois sem este, o estudo não seria possível;*

*Ao meu irmão Francisco M. G. Nunes, pela companhia durante o trabalho de campo;*

*Aos meus familiares, pelo carinho e compreensão.*

## Sumário

Lista de Tabelas.....	vi
Lista de Figuras.....	ix
Resumo.....	xi
Abstract.....	xii
<b>Capítulo I</b>	<b>01</b>
1.1 Introdução .....	01
1.2 Objetivo .....	03
1.3 Metodologia .....	04
1.3.1 Sistemas de Informação Geográfica.....	05
1.3.2 Aquisição dos Dados em Meio Digital .....	06
1.3.3 Transferência dos Dados para o Ambiente SIG (Spring) .....	07
1.3.4 Metodologia Quantitativa para a Análise de Instabilidade de Taludes .....	09
1.3.5 Integração dos Dados em Ambiente SIG .....	10
1.3.6 Controle de Campo .....	11
<b>Capítulo II</b>	<b>12</b>
1. Localização e Aspectos Gerais da Área de Estudo .....	12
1.1 Localização .....	12
1.2 Aspectos Gerais .....	14
1.2.1 Aspectos Geomorfológicos .....	14
1.2.2 Aspectos Geológicos .....	22
1.2.3 Aspectos Pluviométricos .....	26
1.2.3.1 Dados de Pluviosidade .....	27
1.2.4 Aspectos Pedológicos .....	31
1.2.4.1 Cambissolos .....	33
1.2.4.2 Podzólicos .....	36
1.2.4.3 Solos Hidromórficos .....	37
1.2.4.4 Afloramentos de Rochas +Solos Litólicos .....	38
<b>Capítulo III</b>	<b>39</b>
1. Processamento e Interpretação de Imagem Digital de Sensoriamento Remoto .....	39
1.1 Técnicas de Processamento de Imagem Digital no SPRING .....	40
1.1.1 Técnica de Pré Processamento de Imagens .....	40
1.1.1.1 Correção Geométrica .....	40
1.1.1.2 Geo-referenciamento .....	40
1.1.2 Técnica de Realce de Imagens .....	41
1.1.2.1 Composição Colorida .....	41
1.1.2.2 Aumento de Contraste .....	44
1.1.3 Técnica de Classificação Digital para a Produção das cartas de Uso e Ocupação do Solo .....	44
1.2 Coleta das Amostras de Cada Classe Identificada .....	45
2. Uso e Ocupação do Solo .....	51
2.1 Legenda das Cartas de Uso e Ocupação do Solo .....	51
2.2 Análise Multitemporal do Uso e Ocupação do Solo .....	55
<b>Capítulo IV</b>	<b>58</b>
1. Método de Lopes para a Obtenção dos Valores da Coesão e Ângulo de Atrito Interno .....	58
<b>Capítulo V</b>	<b>73</b>
1. Instabilidade de Taludes .....	73
1.1 Escorregamento e Evolução Natural das Encostas na Serra do Mar .....	73
1.2 Importância da Vegetação na Estabilidade de Taludes .....	75
1.3 Aplicação da Equação de Fatores de Segurança na Avaliação de Instabilidade de Taludes .....	77

2. Análise e Discussão dos Resultados.....	91
2.1 Análise dos Resultados da Equação de Fatores de Segurança (Fs) .....	91
2.2 Análise e Discussão do Mapa de Índices de Segurança das Encostas.....	93
<b>Capítulo VI</b>	<b>96</b>
<b>Conclusão</b> .....	<b>96</b>
<b>Considerações Finais</b> .....	<b>99</b>
<b>Referências Bibliográficas</b> .....	<b>101</b>
<b>Anexo 01 – Programa de Linguagem Espacial para Geoprocessamento Algébrico Utilizado na Integração dos Dados</b> .....	<b>106</b>
<b>Anexo 02 – Ábaco de Ruptura Circular de HOEK (1970)</b> .....	<b>112</b>
<b>Anexo 03 – Mapa de Cicatrizes de Escorregamentos da Área de Estudo</b> .....	<b>113</b>
<b>Anexo 04 – Fotografias de Cicatrizes de Escorregamentos da Área de Estudo</b> .....	<b>114</b>

## Lista de Tabelas

Tabela 01-Sub-Regiões e Unidades Ambientais Naturais da Área de Estudo.....	14
Tabela 02- Principais Características e Aplicações das Bandas Adquiridas para o Mapeamento de Uso e Ocupação do Solo (Landsat-7).....	42
Tabela 03- Dados obtidos a partir do diagrama da envoltória e respectivas funções X e Y (unidade de solo Ca1).....	63
Tabela 04- Dados obtidos a partir do diagrama da envoltória e respectivas funções X e Y (unidade de solo Ca3).....	63
Tabela 05- Dados obtidos a partir do diagrama da envoltória e respectivas funções X e Y (unidade de solo Ca5).....	64
Tabela 06- Dados obtidos a partir do diagrama da envoltória e respectivas funções X e Y (unidade de solo Ca8).....	64
Tabela 07- Dados obtidos a partir do diagrama da envoltória e respectivas funções X e Y (unidade de solo Af).....	64
Tabela 08- Dados obtidos a partir do diagrama da envoltória e respectivas funções X e Y (unidade de solo Cd).....	64
Tabela 09- Dados obtidos a partir do diagrama da envoltória e respectivas funções X e Y (unidade de solo PVa2).....	64
Tabela 10- Dados obtidos a partir do diagrama da envoltória e respectivas funções X e Y (unidade de solo PVa5).....	64
Tabela 11- Determinação dos valores das funções X e Y e dos valores de (c) em função de ( $\phi$ ) para cada um dos taludes estudados ( unidade de solo Ca1).....	65
Tabela 12- Determinação dos valores das funções X e Y e dos valores de (c) em função de ( $\phi$ ) para cada um dos taludes estudados ( unidade de solo Ca3).....	65
Tabela 13- Determinação dos valores das funções X e Y e dos valores de (c) em função de ( $\phi$ ) para cada um dos taludes estudados ( unidade de solo Ca5).....	65
Tabela 14- Determinação dos valores das funções X e Y e dos valores de (c) em função de ( $\phi$ ) para cada um dos taludes estudados ( unidade de solo Ca8).....	65
Tabela 15- Determinação dos valores das funções X e Y e dos valores de (c) em função de ( $\phi$ ) para cada um dos taludes estudados ( unidade de solo Af).....	66
Tabela 16- Determinação dos valores das funções X e Y e dos valores de (c) em função de ( $\phi$ ) para cada um dos taludes estudados ( unidade de solo Cd).....	66
Tabela 17- Determinação dos valores das funções X e Y e dos valores de (c) em função de ( $\phi$ ) para cada um dos taludes estudados ( unidade de solo PVa2).....	66
Tabela 18- Determinação dos valores das funções X e Y e dos valores de (c) em função de ( $\phi$ ) para cada um dos taludes estudados ( unidade de solo PVa5).....	66
Tabela 19- Cálculo das funções X e Y com a substituição dos valores de (c) e ( $\phi$ ) determinados, para cada intercepto de taludes ( unidade de solo Ca3).....	69
Tabela 20- Cálculo das funções X e Y com a substituição dos valores de (c) e ( $\phi$ ) determinados, para cada intercepto de taludes ( unidade de solo Ca5).....	69
Tabela 21- Cálculo das funções X e Y com a substituição dos valores de (c) e ( $\phi$ ) determinados, para cada intercepto de taludes ( unidade de solo Ca8).....	69
Tabela 22- Cálculo das funções X e Y com a substituição dos valores de (c) e ( $\phi$ ) determinados, para cada intercepto de taludes ( unidade de solo Af).....	69
Tabela 23- Cálculo das funções X e Y com a substituição dos valores de (c) e ( $\phi$ ) determinados, para cada intercepto de taludes ( unidade de solo Cd).....	70
Tabela 24- Cálculo das funções X e Y com a substituição dos valores de (c) e ( $\phi$ ) determinados, para cada intercepto de taludes ( unidade de solo PVa2).....	70
Tabela 25- Cálculo das funções X e Y com a substituição dos valores de (c) e ( $\phi$ ) determinados, para cada intercepto de taludes ( unidade de solo PVa5).....	70
Tabela 26- Média dos Fatores de Segurança determinados para cada talude ( unidade de solo Ca3).....	71
Tabela 27- Média dos Fatores de Segurança determinados para cada talude ( unidade de solo Ca5).....	71
Tabela 28- Média dos Fatores de Segurança determinados para cada talude ( unidade de solo Ca8).....	71



Tabela 58 – Índice de segurança e declividade crítica para cada unidade de solos em encostas com vegetação/ sem horizonte C.....	92
Tabela 59 - Índice de segurança e declividade crítica para cada unidade de solos em encostas sem vegetação/ sem horizonte C.....	92
Tabela 60 - Índice de segurança e declividade crítica para cada unidade de solos em encostas com vegetação/ com horizonte C.....	93
Tabela 61 - Índice de segurança e declividade crítica para cada unidade de solos em encostas sem vegetação/ com horizonte C.....	93

## Lista de Figuras

Figura 01 – Fluxograma do Processo de Aquisição dos dados em Meio Digital.....	07
Figura 02 – Fluxograma de Transferência de Dados para o Ambiente SIG.....	09
Figura 03 – Mapa de Localização da Área de Estudo.....	13
Figura 04 – Mapa de Unidades Ambientais Naturais da Área de Estudo.....	15
Figura 05 – Foto da UAN de Serras: Observa-se num primeiro plano, rampas aplainadas com remanescentes de pedimentos. Ao fundo a Serra do Marumbi com vertentes retilíneas e convexas, predominando erosão em forma de grotões.....	17
Figura 06 – Foto da UAN de Colinas: Colinas arredondadas com vertentes convexas na região de Planície Litorânea.....	18
Figura 07 – Foto da UAN de Morros: Morros que sobressaem na região de planície, com encostas íngremes.....	19
Figura 08 – Foto da UAN de Planície Aluvial: Foz do Rio Marumbi próximo a cidade de Morretes, com margem larga e relativamente assimétrica, podendo observar a formação de pequenas ilhas por depósitos fluviais.....	20
Figura 09 – Foto da UAN de Planalto Ondulado: Observa-se um relevo mais rebaixado que as regiões de Serras, com colinas arredondadas e vertentes convexas.....	21
Figura 10 – Mapa Geológico da Área de Estudo.....	23
Figura 11 – Gráfico do Índice de Precipitação na Estação Veu da Noiva a 680m de altitude (Período: 1980 – 1996).....	29
Figura 12 – Gráfico do Índice de Precipitação na Estação São João da Graciosa a 159m de altitude (Período: 1980 – 1998).....	29
Figura 13 – Gráfico do Índice de Precipitação na Estação Marumbi a 60m de altitude (Período: 1980 – 1998).....	30
Figura 14 – Gráfico do Índice de Precipitação na Estação Morretes a 8m de altitude (Período: 1980 – 1998).....	30
Figura 15 – Mapa de Solos da Área de Estudo.....	32
Figura 16 – Composição Colorida (RGB) das bandas 3, 4 e 5 da Imagem Landsat 7 – TM órbita/ ponto 220-77 de 14/09/1999.....	43
Figura 17 – Exemplo de imagem segmentada com amostras da classe de vegetação de porte arbóreo.....	46
Figura 18– Foto da observação do controle de campo da classe de uso e ocupação do solo de vegetação de porte arbóreo.....	46
Figura 19 – Exemplo de imagem segmentada com amostras da classe de vegetação de porte herbáceo e arbustivo.....	47
Figura 20– Foto da observação do controle de campo da classe de uso e ocupação do solo da vegetação de porte herbáceo e arbustivo.....	47
Figura 21 – Exemplo de imagem segmentada com amostras da classe de agricultura.....	48
Figura 22- Foto da observação do controle de campo da classe de uso e ocupação do solo de agricultura.....	48
Figura 23 – Exemplo de imagem segmentada com amostras da classe de área urbana.....	49
Figura 24– Foto da observação do controle de campo da classe de uso e ocupação do solo de área urbana.....	49
Figura 25 - Fluxograma da Fase de Processamento e Interpretação das Imagens de Satélite para a Confeção das Cartas de Uso e Ocupação do Solo (1986, 1999).....	50
Figura 26 – Mapa de Uso e Ocupação do Solo de 1953 da Área de Estudo.....	52
Figura 27 – Mapa de Uso e Ocupação do Solo de 1986 da Área de Estudo.....	53
Figura 28 – Mapa de Uso e Ocupação do Solo de 1999 da Área de Estudo.....	54
Figura 29 – Gráfico da variação das classes de uso e ocupação do solo da área em estudo (anos de 1953, 1986 e 1999).....	57
Figura 30 – Diagrama dos perfis topográficos, traçado da envoltória ( em vermelho) e escolha dos pares de ângulo/ altura máxima estável ( unidade de solo Ca1).....	58
Figura 31 – Diagrama dos perfis topográficos, traçado da envoltória ( em vermelho) e escolha dos pares de ângulo/ altura máxima estável ( unidade de solo Ca3).....	59
Figura 32 – Diagrama dos perfis topográficos, traçado da envoltória ( em vermelho) e escolha dos pares de ângulo/ altura máxima estável ( unidade de solo Ca5).....	59

Figura 33 – Diagrama dos perfis topográficos, traçado da envoltória ( em vermelho) e escolha dos pares de ângulo/ altura máxima estável ( unidade de solo Ca8).....	60
Figura 34 – Diagrama dos perfis topográficos, traçado da envoltória ( em vermelho) e escolha dos pares de ângulo/ altura máxima estável ( unidade de solo Af).....	60
Figura 35 – Diagrama dos perfis topográficos, traçado da envoltória ( em vermelho) e escolha dos pares de ângulo/ altura máxima estável ( unidade de solo Cd).....	61
Figura 36 – Diagrama dos perfis topográficos, traçado da envoltória ( em vermelho) e escolha dos pares de ângulo/ altura máxima estável ( unidade de PVa2).....	61
Figura 37 – Diagrama dos perfis topográficos, traçado da envoltória ( em vermelho) e escolha dos pares de ângulo/ altura máxima estável ( unidade de solo PVa5).....	62
Figura 38 – Diagrama de (c) contra $\phi$ dos taludes selecionados (unidade de solo Ca1).....	67
Figura 39 – Diagrama de (c) contra $\phi$ dos taludes selecionados (unidade de solo Af).....	67
Figura 40 – Diagrama de (c) contra $\phi$ dos taludes selecionados (unidade de solo Ca3).....	67
Figura 41 – Diagrama de (c) contra $\phi$ dos taludes selecionados (unidade de solo Ca5).....	67
Figura 42 – Diagrama de (c) contra $\phi$ dos taludes selecionados (unidade de solo Ca8).....	68
Figura 43 – Diagrama de (c) contra $\phi$ dos taludes selecionados (unidade de solo Cd).....	68
Figura 44 – Diagrama de (c) contra $\phi$ dos taludes selecionados (unidade de solo PVa2).....	68
Figura 45 – Diagrama de (c) contra $\phi$ dos taludes selecionados (unidade de solo PVa5).....	68
Figura 46 – Mapa de Declividade da Área de Estudo.....	80
Figura 47 – Mapa de Índice de Segurança das Encostas.....	95
Figura 48 – Ábaco de Ruptura Circular de Hoek (1970).....	112
Figura 49 – Mapa de Cicatrizes de escorregamento da Área de Estudo.....	113
Figura 50 – Foto de cicatriz de escorregamento antiga devido ao corte da estrada (BR –277 km 48). Pode-se observar a retomada da cobertura vegetal na encosta.....	115
Figura 51 – Foto de cicatriz de escorregamento recente devido ao corte da estrada ( BR – 277 km 47)....	115
Figura 52 – Foto de cicatriz de escorregamento recente devido ao corte da estrada ( BR – 277 km 46)....	116
Figura 53 – Foto de cicatrizes naturais na Serra do Marumbi por processo de escorregamento gravitacional. Pode-se observar a presença de vegetação de porte arbóreo sobre as encostas.....	116
Figura 54 – Foto de cicatrizes de escorregamentos com obra de contenção ao longo da estrada ( BR – 277 km 41).....	117
Figura 55 – Foto do zoom da cicatriz de escorregamento da figura 54. Pode-se observar obras de contenção sobre a encosta, devido ao escorregamento provocado pelo corte da estrada (BR–277 km 41)	117

## Resumo

O presente trabalho consiste na aplicação de um modelo matemático acoplado à utilização de técnicas de mapeamento temático em ambiente SIG, objetivando desenvolver uma metodologia voltada ao estudo dos fatores de segurança na estabilidade de encostas. Este modelo matemático, estruturado na distribuição das forças atuantes em uma vertente infinita, leva em conta a influência da vegetação sobre as encostas, e os índices físicos e as propriedades mecânicas de cada unidade de solos. Os índices físicos e as propriedades mecânicas dos solos, bem como o papel da vegetação na estabilidade das encostas, permitiram a quantificação dos riscos de escorregamento para cada unidade de solo analisada. Como um primeiro resultado, apresenta-se a criação de um banco de dados digital, contendo informações preliminares das características do terreno, através da confecção de cartas temáticas tais como: topográfica, geológica, declividade e de uso e ocupação do solo dos anos de 1953, 1986 e 1999. Todas essas cartas foram transferidas para meio digital, permitindo as suas interpolações em ambiente SIG. Para os cálculos dos fatores de segurança das vertentes foram considerados como atributos: a inclinação das encostas; os índices físicos e as propriedades mecânicas dos solos, com a presença de água (solo saturado); a influência da cobertura vegetal (peso das árvores e sistema solo-raiz) e a força do vento atuando nas copas das árvores. As propriedades físicas e mecânicas dos solos (ângulo de atrito interno e coesão), foram determinadas pelo método de retroanálise desenvolvido por Lopes (1995). O método envolveu inicialmente a foto interpretação de cicatrizes de escorregamentos, para a elaboração de perfis topográficos, que determinaram os pares de altura/ângulo de taludes limites. Como resultado final, apresenta-se uma metodologia que possibilita o mapeamento dos diferentes graus de riscos ao escorregamento, a partir da interpolação em geoprocessamento das cartas temáticas com os dados obtidos pelas equações de fator de segurança.

## Abstract

The purpose of this dissertation is to develop a methodology concerned with the study of safety factors on slope stability through the application of a mathematical model combined with the utilisation of techniques of thematic mapping within GIS. Such mathematical model, structured on the distribution of operating forces on an infinite slope, takes into account the influence of vegetation cover over slopes, as well as the physical index and mechanical features of each soil unit. The physical index and the mechanical features of the soils, as well as the role played by vegetation cover on slope stability, allowed the quantification of the risks of landslides for each soil unit analysed. As a first result, was created a bank of digital data comprising preliminar information on thematic charts such as: topographical, geological, geomorphologic, declivity, land use and land occupation for 1953, 1986 and 1999. All these charts were digitalised in order to make possible its interpolations within GIS. The safety factors were calculated based upon attributes such as: inclination of the slopes, physical index and mechanical features of the soils, existence of water (saturated soil), influences of vegetation cover (trees weight and system soil-root) and wind speed on the top of the tress. The mechanical and physical properties (angle of internal friction and cohesion) were estimated by the method of retroanalysis developed by Lopes (1995). Such method initially involved photointerpretation of landslide scars so as to elaborate topographical profiles, which determined the pairs of height/angle of slopes-limit. The final achievement is shown to have created a methodology that allows the mapping of different degrees of slope failure risks, by using the interpolation of thematic charts within geoprocessing, with the data obtained by means of equations of safety factor.

## **Capítulo I**

### **1.1 Introdução**

Os deslizamentos das encostas e a erosão acelerada estão intrinsecamente associados à atuação dos processos dinâmicos de evolução da paisagem. Esses processos dizem respeito à fragilidade estrutural e ao funcionamento do meio natural a qualquer tipo de intervenção, bem como das áreas que apresentam riscos à ocupação desordenada, tornando-se assim, indispensável o conhecimento da dinâmica ambiental de uma determinada região, na busca de alternativas que minimizem qualquer tipo de impacto ambiental.

A presente área em estudo, abrange as bacias hidrográficas formadoras do médio curso do Rio Nhundiaquara, situadas na porção central do município de Morretes. Nesta área encontra-se uma pequena porção da Serra do Mar e da planície litorânea do Estado do Paraná.

A região da Serra do Mar, no Paraná, enquadram-se dentro de uma fragilidade potencial elevada, devido à sua própria configuração paisagística, onde diversos fatores do meio natural se combinam, caracterizando um sistema altamente sensível, de relevo acidentado, densa cobertura florestal e elevado índice pluviométrico. Essas características conferem à área uma geodinâmica de evolução de encostas, cujo processo dominante é o movimento de massa.

De acordo com FIORI (1995<sup>a</sup>), o movimento de massa constitui um sério problema em áreas degradadas pela atividade humana irracional ou obras de engenharia, que não atentam para a preservação do meio ambiente, levando à intensificação dos processos de escorregamento ou de erosão acelerada. Sendo assim, constatamos que, a Serra do Mar no Paraná é uma área propícia a movimentos de massas, principalmente aquelas sujeitas à intervenção antrópica.

Na área de estudo, a intervenção antrópica é realizada principalmente pelo desmatamento ocasionado pela extração de espécies nobres de madeira, cortes de estradas e rodovias, agricultura e urbanização. Essas atividades deixam o solo desnudo e aceleram episódios catastróficos de deslizamentos, como os ocorridos e notificados pela mídia. Como exemplos de alguns escorregamentos, temos no ano de 1996 no Km 41 da BR-277, um deslizamento que interrompeu a pista por dois dias. No ano de 1999 aconteceu outro

deslizamento, no mesmo lugar, causando um congestionamento de cerca de 4.200 veículos, que ficaram impedidos de trafegar. Outros eventos menores, entretanto, ocorrem continuamente na área, especialmente nos períodos de chuvas mais intensas.

Além dos escorregamentos provocados pela intervenção antrópica, devido aos cortes de estradas, urbanização e desmatamento para agricultura e pastagem, outros processos de escorregamentos podem ser observados na área em estudo, são os escorregamentos provocados pela própria dinâmica natural de evolução das encostas, sendo esses de menor intensidade, mas de grande importância no estudo da dinâmica ambiental das encostas.

Para o prosseguimento do trabalho, a presente dissertação foi organizada em capítulos, que tratam dos principais temas necessários ao seu desenvolvimento, como segue abaixo.

O primeiro capítulo apresenta o objetivo do trabalho e a descrição da metodologia quantitativa acoplada às técnicas de Sistemas de Informação Geográfica, que serviram para a análise e mapeamento dos fatores de segurança das encostas.

No capítulo 2 realiza-se um breve levantamento das características dos principais elementos constituintes da paisagem, que influenciam na análise de estabilidade de encostas como: geologia, geomorfologia, índice de precipitação pluviométrica e pedologia.

O capítulo 3 aborda as técnicas de processamento e interpretação de imagens digitais de sensoriamento remoto utilizadas, para o mapeamento do uso e ocupação do solo de 1986 e 1999, bem como a análise multitemporal do uso e ocupação do solo dos últimos 46 anos.

O capítulo 4 é destinado a demonstrar como o método de Lopes (LOPES, 1995) foi empregado no decorrer deste trabalho, para a obtenção dos valores de coesão e ângulo de atrito interno de cada tipo de solo, de forma indireta, através de retroanálise.

O capítulo 5 apresenta a aplicação da equação de fatores de segurança das encostas, bem como os resultados e análises dos resultados obtidos pela equação. Este capítulo trata em especial, da importância da vegetação na estabilidade das encostas, sendo considerados para efeito de cálculos, parâmetros como a contribuição das raízes na coesão do solo, peso das árvores e a força do vento nas copas das árvores.

O último capítulo aponta algumas considerações sobre a metodologia e técnicas empregadas no trabalho, além das observações inferidas, da influência da vegetação na estabilidade de encostas e as conclusões dos dados obtidos durante a aplicação da equação dos fatores de segurança e seu respectivo mapeamento.

## 1.2 Objetivo

O principal objetivo deste estudo é o desenvolvimento de uma metodologia voltada para o levantamento de áreas de riscos, cartografando os diferentes índices de segurança das encostas aos escorregamentos, aplicados a uma metodologia quantitativa associada às técnicas de Sistema de Informação Geográfica.

Para tal, foi necessário efetuar alguns objetivos específicos a seguir:

- Identificação do conjunto dos elementos constituintes da paisagem como: uso e ocupação do solo, relevo, geologia, precipitação e tipos de solos;
- Criação de um banco de dados em ambiente SIG, contendo todas as informações necessárias dos elementos constituintes da paisagem (descritos acima);
- Análise da evolução multitemporal do uso e ocupação do solo, verificada a partir das mudanças ocorridas na cobertura vegetal. Para tal, realizou-se um resgate de informações contidas em bibliografias e imagens de satélite;
- Identificação e mapeamento das cicatrizes de escorregamento, através de registros contidos em fotografias aéreas;
- Aplicação do método de retroanálise desenvolvido por LOPES (1995), para a obtenção dos pares de valores de coesão e ângulo de atrito interno dos solos;
- Aplicação da equação de fatores de segurança das encostas, baseando-se em modelos matemáticos que se apoiam nas leis físicas e de mecânica dos solos, para a quantificação dos riscos de escorregamentos. Ênfase maior, foi dada a influência da cobertura vegetal na estabilidade das encostas;
- Interpolação em geoprocessamento dos mapas temáticos com os dados obtidos pela equação de fatores de segurança, para a confecção do mapa de índices de segurança das encostas.

### 1.3 Metodologia

Para o desenvolvimento deste trabalho foi realizada a aplicação de modelos matemáticos que visam a análise do potencial de instabilidade das encostas, acoplados à utilização de técnicas de tratamento de dados, em ambiente SIG. Essas técnicas basearam-se na criação de um banco de dados, onde se efetuou a: digitalização de mapas temáticos, processamento e interpretação de imagens de satélite, criação do modelo numérico do terreno e a integração de informações a partir da combinação de mapas e tabelas, por operação algébrica.

Os dados coletados derivaram de cartas topográficas do IBGE, do ano de 1992 na escala 1:50.000 (Folhas de Morretes e Mundo Novo); fotografias aéreas verticais pancromáticas, na escala de 1:25.000 do ano de 1980; imagens de satélite e atividades de campo. As curvas de nível foram obtidas usando um raster scanner nas cartas topográficas, para gerar o modelo numérico do terreno e a respectiva carta de declividade.

Os dados pedológicos, geomorfológicos, geológicos e de uso e ocupação do solo de 1953, foram compilados de mapas pré-existentes e os dados de uso e ocupação do solo de 1986 e 1999, por interpretação de imagens de satélite, em meio digital.

As áreas de escorregamentos foram determinadas pela fotointerpretação em fotografias aéreas, das cicatrizes de escorregamentos evidenciadas no terreno.

Todos esses dados, obtidos a partir de diferentes fontes, foram transferidos para meio digital, através da digitalização dos mesmos, sendo posteriormente armazenados no banco de dados do SIG, usando o sistema de referência cartográfica UTM.

Por fim, gerou-se o mapa de índices de segurança das encostas, a partir do cruzamento das informações armazenadas no banco de dados do SIG, cedidas pelos mapas temáticos de solos, declividade e de uso e ocupação do solo com as informações das tabelas de dados obtidos pela aplicação das equações de fatores de segurança, para cada unidade de solo (ver capítulo V).

Os mapas temáticos utilizados para o desenvolvimento do trabalho foram: o mapa de solos retirado do Levantamento e Reconhecimento dos Solos do Estado do Paraná EMBRAPA & IAPAR (1984), na escala original de 1:600.000 do ano de 1984; o mapa de unidades ambientais naturais retirado do trabalho do IAPARDES (1989), na escala original de

1:250.000 do ano de 1989; o mapa de geológica, já encontrado em meio digital, na escala original de 1:70.000 (inédito) e o mapa de uso e ocupação do solo de 1953 retirado do trabalho de MARCHIORO (1999).

### 1.3.1 Sistemas de Informação Geográfica (SIG)

Técnicas de SIGs vem sendo usadas com sucesso no estudo de instabilidade de encostas. Como exemplos, citam-se as metodologias de: CARRARA et al. (1991) descrita em RODRIGUES, PEJON & ZUQUETE (1997), esta metodologia desenvolvida na Itália, utiliza-se do Sistema de Informação Geográfica (SIG's) e cartografia numérica para facilitar o desenvolvimento do uso de modelos estatísticos para a avaliação do risco de escorregamentos, mapeados em escala regional; e o trabalho de RAMALHO et al. (1994), que propõem uma metodologia para mapeamento geotécnico usando tecnologias de SIGs, programas de computador para análise de estabilidade de taludes e o desenvolvimento de um programa para cadastramento de log de sondagem.

De acordo com FERNANDES & AMARAL (1996), atualmente, no Brasil, são utilizados vários SIG's para o estudo de áreas instáveis, com destaque para o SPRING, o IDRISI, o ARC – INFO e o SAGA, mas ainda são raras as aplicações no campo específico dos deslizamentos.

Cabe aqui apresentar algumas definições sobre SIG, a fim de esclarecer melhor essa técnica.

ROCHA (2000), define SIG como um sistema com capacidade para a aquisição, armazenamento, tratamento, integração, processamento, recuperação, transformação, manipulação, modelagem, atualização, análise e exibição de informações digitais georreferenciadas, topologicamente estruturadas, associadas ou não a um banco de dados alfanuméricos.

CÂMARA & MEDEIROS *apud* ROCHA (2000), indicam como principais características do SIG a capacidade de inserir e integrar, numa única base de dados, informações espaciais provenientes de dados cartográficos, dados censitários e cadastro urbano e rural, imagens de satélite, redes e modelos numéricos de terreno. O SIG possui ainda

a capacidade de oferecer mecanismo para combinar as várias informações, através de algoritmos de manipulação e análise, bem como para consultar, recuperar, visualizar e plotar o conteúdo da base de dados georreferenciados.

### 1.3.2 Aquisição dos Dados em Meio Digital

Na transferência dos dados para o formato digital, utilizou-se o mesmo procedimento elaborado pelo Projeto “Geo-environmental dynamic of Pantanal – Chaco: multitemporal study and previsional modelling” (FIORI et al. 1995).

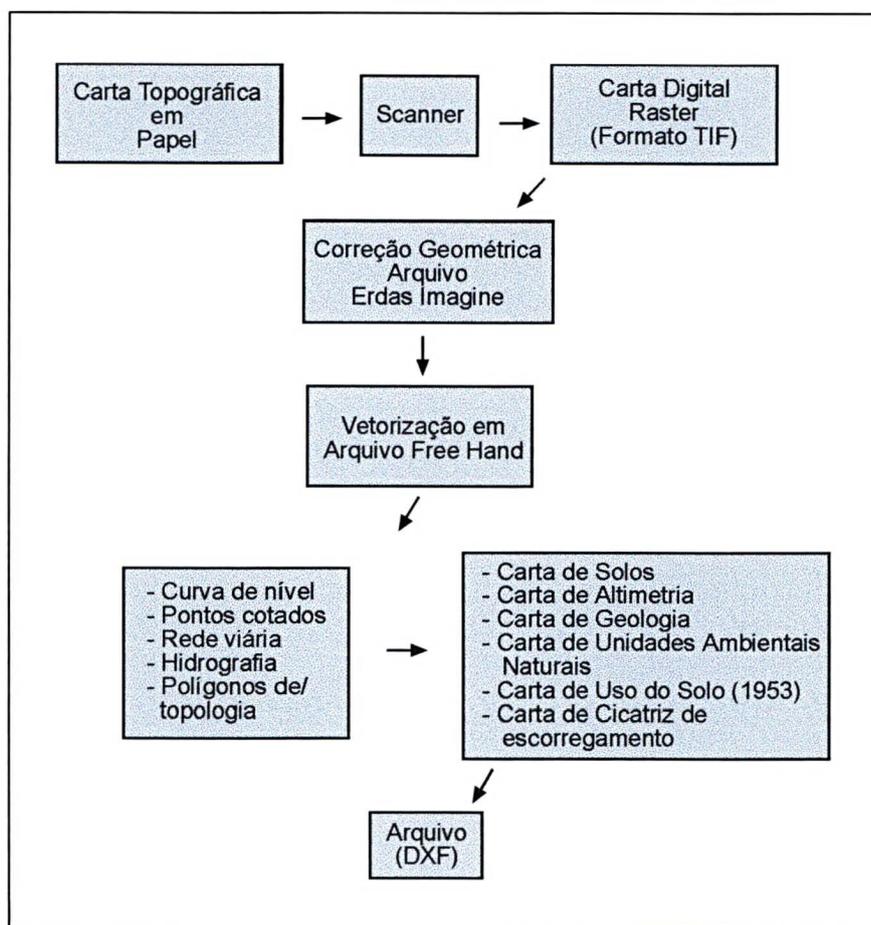
Este procedimento, descrito no fluxograma da figura 01, consiste primeiramente na transferência de dados contidos em cartas topográficas para meio digital, em formato raster, através da sua escanerização. Após a transferência, esses dados são corrigidos geometricamente com 13 pontos de controle ou mais, para eliminar as distorções cartográficas geradas no processo de escanerização, sendo a correção geométrica feita no software Erdas Imagine.

Por último, as cartas já corrigidas, são transportadas para arquivo TIF e trabalhadas como imagens de fundo, na vetorização de seus dados, fazendo-se uso do software Macromedia Free Hand. Cada tema como curvas de níveis, pontos cotados, hidrografia, rede viária e polígonos de topologia são digitalizados segundo o critério de subdivisão de layers. As curvas de nível são reagrupadas em layers separados, conforme a sua cota altimétrica, para um melhor reconhecimento em ambiente SIG.

As cartas temáticas de solo, unidades ambientais naturais, geologia e uso e ocupação do solo de 1953, utilizadas no desenvolvimento deste trabalho, foram inseridas em meio digital utilizando o mesmo processo descrito acima.

Maiores detalhes deste procedimento, podem ser encontrados em KOZCIAK (2000) e PARANHOS FILHO (2000).

Figura 01 – Fluxograma do Processo de Aquisição dos dados em Meio Digital



### 1.3.3 Transferência dos Dados para o Ambiente SIG (Spring)

Durante a fase de transferência das cartas digitalizadas para o ambiente SIG, foi necessário converter as mesmas em arquivo DXF, que é compatível com o software Spring. Para manipulação desses dados dentro do sistema Spring, executaram algumas atividades tais como:

- criação de um banco de dados: que serviu para armazenar todas as informações geográficas a serem trabalhadas, sem estar vinculada a uma área especificamente geográfica;

- criação de um projeto: contendo as informações das propriedades cartográficas (tipo de projeção, datum e coordenadas), permitindo assim, a espacialização geográfica da área de trabalho;

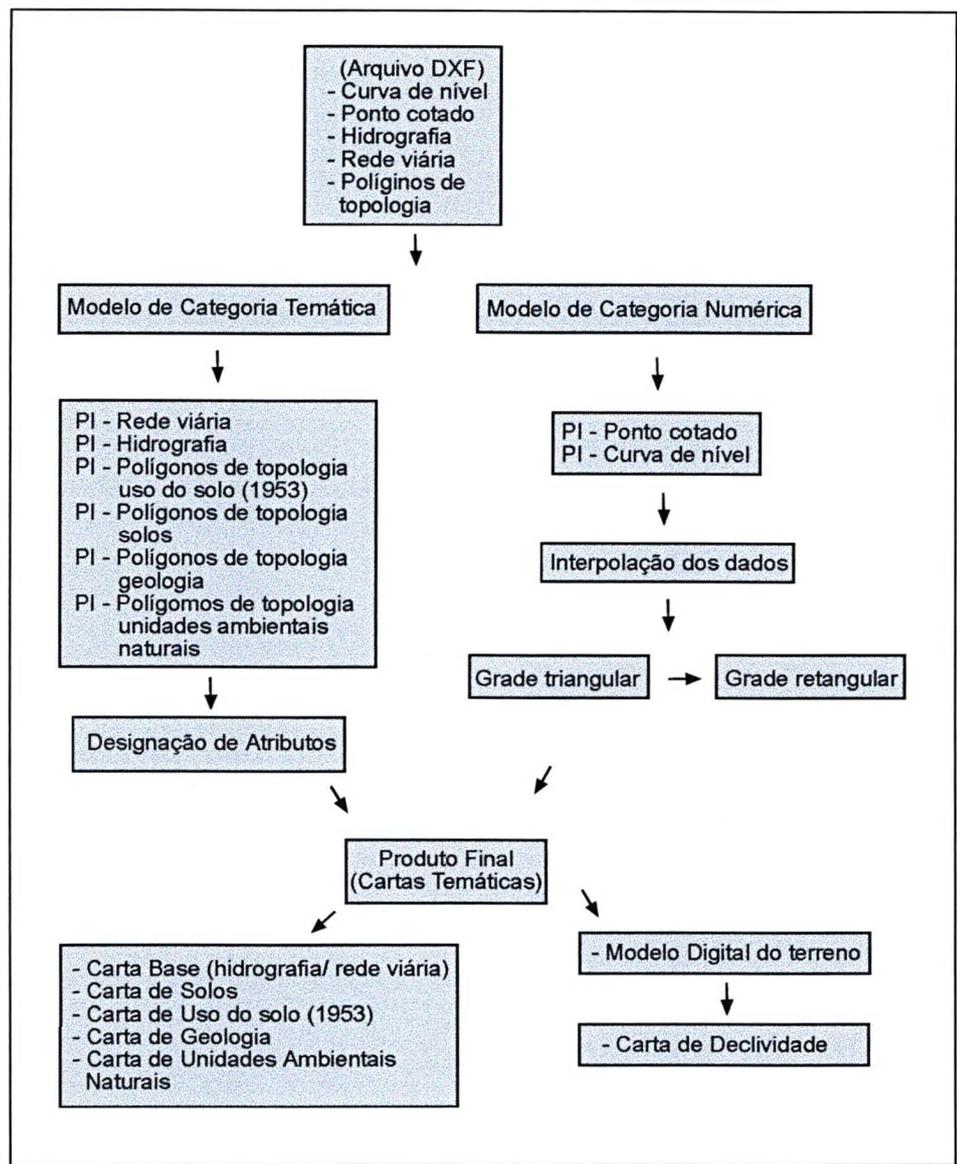
- criação dos tipos de categorias: que permitiu organizar os diferentes tipos de dados geográficos em modelos de categorias. Os tipos de modelos de categorias disponíveis no Spring são: Temático, Imagem, Numérico, Cadastral, Redes e Objetos. A organização dos dados em categorias determina a representação na qual estes serão apresentados, matricial e/ou vetorial e o tipo de operação a ser executada.

- definição dos planos de informação (PI's): o Spring permite definir vários PI's, que devem estar necessariamente associados a uma determinada categoria. Os PI's são os planos de armazenamentos de informações, podendo representar diversas características temáticas.

No trabalho foram criados o PI's dos mapas temáticos de: uso e ocupação do solo (1953, 1986 e 1999), declividade, altimetria, geologia, unidades ambientais naturais e solos. As características ou feições colocadas em cada PI receberam identificações próprias, a partir da designação de seus atributos. Por exemplo, apresenta-se a carta de altimetria, onde em cada curva identificou-se a cota "Z" (cota altimétrica) e a carta de solos onde, para cada polígono topológico, associou-se uma classe temática específica como Ca1, PVa2 etc. As demais cartas geradas seguiram o mesmo procedimento, com as suas respectivas classes temáticas.

A figura 02 apresenta o fluxograma resumido das atividades desenvolvidas durante essa etapa de transferência de dados para o ambiente SIG.

Figura 02- Fluxograma de Transferência de Dados para o Ambiente SIG



1.3.4 Metodologia Quantitativa para a Análise de Instabilidade de Taludes

A metodologia quantitativa realiza a análise de risco em função da determinação de valores numéricos de fatores de segurança, que permitem a quantificação do risco de escorregamento em encostas, considerando os índices físicos e as propriedades mecânicas dos solos, além de alguns parâmetros da vegetação como: o sistema solo raiz, peso das árvores e a atuação da força do vento nas copas das árvores.

Por outro lado, as estimativas de instabilidade de encostas executadas pela metodologia qualitativa, baseiam-se, apenas em atributos subjetivos que são avaliados através da atribuição de pesos arbitrários conforme a sua importância, de acordo com cada pesquisador. Geralmente, a metodologia qualitativa não leva em consideração as propriedades físicas e mecânicas do solo e alguns parâmetros da vegetação, que são de fundamental importância para avaliação dos fatores de segurança em uma encosta.

Para a aplicação da metodologia quantitativa na presente pesquisa, utilizou-se a análise do equilíbrio limite das forças atuantes em uma encosta, através da aplicação da equação de fatores de segurança (Fs), descrita no Capítulo V.

### 1.3.5 Integração dos Dados em Ambiente SIG

O mapa de índices de segurança das encostas foi gerado, inicialmente, a partir da interpolação do mapa de declividade, sobreposto ao mapa de uso e ocupação do solo e ao mapa de solos, observando a suscetibilidade de cada unidade de solos, ao escorregamento, através dos resultados obtidos pela equação de fatores de segurança.

A integração dos dados deu-se em ambiente SIG, tendo como ferramenta o software Spring. Para tal interpolação, utilizou-se a linguagem de programação espacial para geoprocessamento algébrico (*LEGAL*), disponível no software. Essa linguagem de programação trabalha com expressões aritméticas para a análise e tabulação cruzada de dados contidos em mapas e tabelas. O programa elaborado para a integração dos dados utilizados neste trabalho, pode ser verificado no anexo 01.

Para a confecção do mapa de índices de segurança das encostas, foram estabelecidas classes de estabilidade e instabilidade das encostas, definidas em:

- **Zonas de instabilidade declarada:** apresenta fator de segurança  $< 1$ , possuindo taludes frágeis quando submetidos a condições desfavoráveis à sua estabilidade, como por exemplo, episódios esporádicos de chuvas intensas e implantação de cortes ou aterros;

- **Zonas sensíveis:** apresenta fator de segurança com intervalo variando entre 1,5 a 1, com condição limite de estabilidade, sendo iminente a ruptura;
- **Zonas estabilizadas por cobertura vegetal:** apresenta fator de segurança  $> 1$ , apenas quando se considera a vegetação para efeito de cálculo, quando desconsiderada a vegetação, estas mesmas áreas, apresentam fator de segurança  $< 1$ ;
- **Zonas estáveis:** apresenta fator de segurança  $> 1$ , quanto maior o fator de segurança, menor serão as possibilidades de escorregamento nos taludes, quando submetidos a condições desfavoráveis à sua estabilidade.

#### 1.3.6 Controle de Campo

Os levantamentos de campo realizados no decorrer da pesquisa foram de grande utilidade no esclarecimento de dúvidas sobre os alvos observados nas imagens de satélite e nas fotografias aéreas, para o seu mapeamento.

Estes levantamentos ocorreram em áreas de fácil acesso ao longo da BR-277 e de algumas vias secundárias, sendo realizados com o apoio das cartas topográficas, das fotografias aéreas e da imagem de satélite do ano de 1999.

Durante esta atividade objetivou-se em uma primeira etapa, o prévio reconhecimento da área e, em uma segunda etapa, a verificação da refletância de cada classes observada na imagem de satélite pela sua localização no campo, a partir de pontos de controles.

As atividades de campo serviram também, para a conferência das áreas de cicatrizes de escorregamentos mapeadas nas fotografias aéreas.

## **Capítulo II**

### **1. Localização e Aspectos Gerais da Área de Estudo**

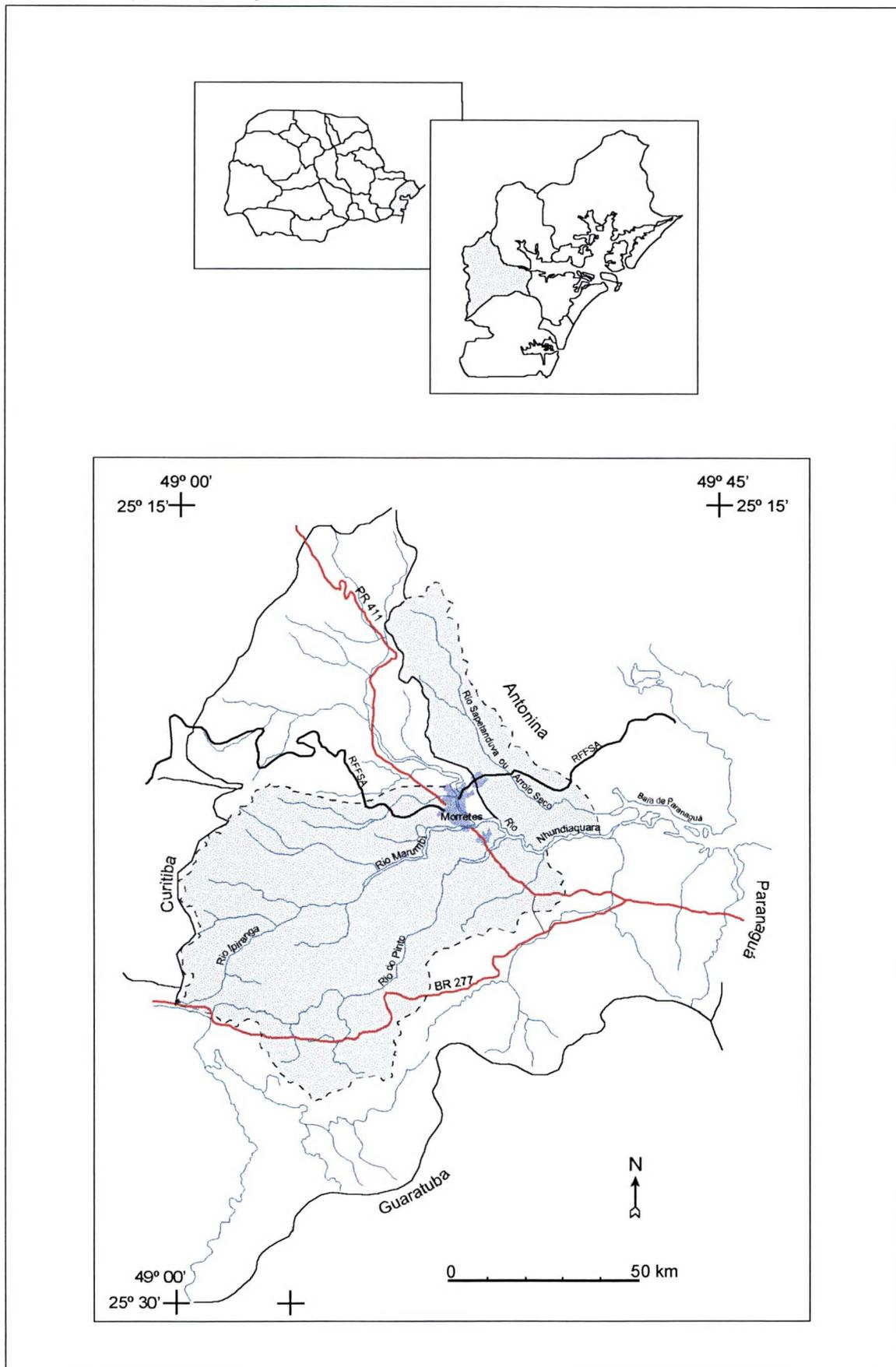
#### **1.1 Localização**

A área em estudo abrange as bacias hidrográficas formadoras do médio curso do rio Nhundiaquara, localizadas na porção central do município de Morretes, entre as coordenadas de 25° 22' e 25° 37' de latitude sul, 48° 43' e 48° 59' de longitude oeste. Como principais tributários formadores do médio curso do rio Nhundiaquara, apresentam-se os rios: Marumbi, Bom Jardim, Brumado, do Pinto, Sapetanduva ou Arroio Seco, Passa-Sete, Iporanga e Ipiranga.

A área correspondente às bacias hidrográficas em estudo compreende uma pequena porção da Serra do Mar e da Planície Litorânea do Paraná, possuindo 282 km<sup>2</sup> de extensão, sendo delimitada a oeste pelas vertentes orientais da Serra do Marumbi, ao sul pela BR-277, ao norte pela estrada de ferro que liga Curitiba a Paranaguá e a leste pela planície aluvial do rio Nhundiaquara, fazendo limite com a sede municipal de Morretes a nordeste (figura 03).

Os acessos a esta área podem ser realizados pela BR-277, estrada da Graciosa e pela ferrovia que liga Curitiba a Paranaguá.

Figura 03 - Mapa de Localização da Área de Estudo



## 1.2. Aspectos Gerais

### 1.2.1 Aspectos Geomorfológicos

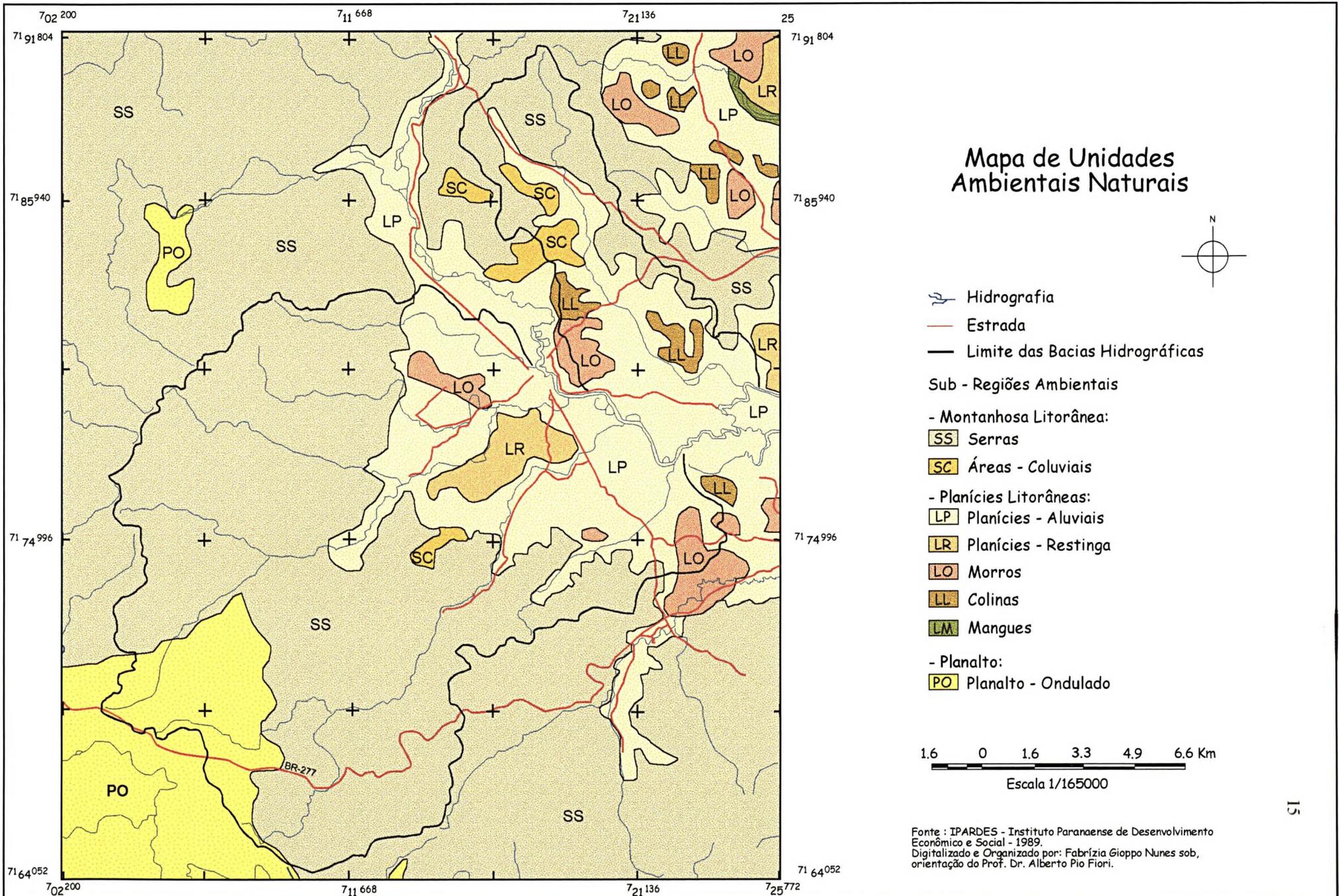
A morfologia da área em estudo, segundo o IPARDES (1989), compreende três sub-regiões principais: Montanhosa Litorânea, Planícies Litorâneas e Planaltos. Embora esta última não pertença geograficamente ao litoral, os municípios da microrregião do litoral incluem uma pequena porção do Primeiro Planalto Paranaense, como pode ser verificado no município de Morretes. Ainda segundo o IPARDES (1989), essas sub-regiões foram divididas em Unidades Ambientais Naturais, conforme as suas características geomórficas. As Unidades Ambientais Naturais que compõem a área das bacias hidrográficas em estudo e suas respectivas sub-regiões estão representadas na tabela 01 e na figura 04.

Tabela 01 - Sub- Regiões e Unidades Ambientais Naturais da Área de Estudo

Sub- Região	Unidade Ambiental Natural (UAN)
Montanhosa Litorânea	Serras Áreas Coluviais
Planícies Litorâneas	Colinas Morros Planícies Aluviais Planícies de Restingas
Planaltos	Planalto Ondulado

Fonte: Adaptado de IPARDES (1989).

Figura 04 - Mapa de Unidades Ambientais Naturais da Área de Estudo



## Unidade Ambiental Natural de Serras

A UAN de Serras corresponde à área dos grandes maciços rochosos representados pela Serra do Marumbi, aparecendo predominantemente nas porções noroeste e sudeste da área das bacias em estudo (figura 05). O relevo desta unidade é muito acidentado, com fortes declividades, geralmente superior a 30% e elevada amplitude altimétrica, variando de 200 a 1.500 metros.

No conjunto da Serra, aparecem cristas angulosas em grande seqüência, com direção NW-SE e seqüências de cristas arredondadas, com direções NW-SE, NE-SE. De um modo geral, os topos apresentam-se em formas arredondadas, com vertentes côncavas - retilínea-convexas, predominando as vertentes convexas em toda a sua extensão (OKA-FIORI & CANALI, 1987). Neste compartimento manifestam-se também, em grande quantidade, escarpas dotadas de taludes íngremes e vertentes que formam paredões abruptos intercalando-se com as vertentes convexas, formando os vales do rio Marumbi e de alguns de seus afluentes, bem encaixados nos vales em forma de “vê”.

A litologia é composta de granito, migmatitos e depósitos de talus, com os solos variando de acordo com a declividade e o material de origem, sendo cada vez mais rasos e menos desenvolvidos à medida que a declividade e a altitude aumentam.

Essa unidade é bem drenada, encontram-se aqui as cabeceiras dos cursos principais, ou seja, grande parte dos canais de primeira ordem, com densidade hidrográfica alta e padrão de drenagem do tipo dendrítico a subparalelo.

Nesta unidade pode-se notar a presença de ombreiras nas margens do rio Iporanga, que representariam, segundo BIGARELLA (1978), restos de pedimentos. Neste local, ocorrem ainda cicatrizes antrópicas ao longo da estrada R.F.F.S.A, no contado deste compartimento com a planície aluvial e a presença de cicatrizes naturais de escorregamentos nas áreas mais elevadas do conjunto Marumbi.

Conforme OKA-FIORI & CANALI (1987), na região de serras aparecem poucos casos de erosão lateral acelerada, sendo esta apenas nas altitudes mais baixas próximo aos cursos principais, predominando na área a erosão do tipo linear (grotões).



Figura 05- UAN de Serras: Observa-se num primeiro plano, rampas aplainadas com remanescentes de pedimentos. Ao fundo a Serra do Marumbi com vertentes retilíneas e convexas, predominando erosão em forma de grotões (Foto do autor- 1999).

### Unidade Ambiental Natural de Áreas Colúviais

A UAN de Áreas Colúviais pertencente à Sub-região Montanhosa Litorânea, inclui as partes baixas das vertentes onde ocorreram processos da acumulação de sedimentos provenientes das partes altas. Segundo o IPARDES (1989), esses sedimentos, diferentemente dos das áreas aluviais, não apresentam evidências de terem sido transportados por meio fluvial e sim por processos comandados pela gravidade.

Nesta unidade os solos aparecem mais profundos e desenvolvidos com uma declividade geralmente baixa, mas podendo em certos casos, atingir até 45% de declive.

### Unidade Ambiental Natural de Colinas

O IPARDES (1989), descreve as colinas como áreas de elevações de perfil convexo e relevo mais suave que os morros. A declividade de suas encostas é geralmente inferior a 20%. O substrato geológico é formado por sedimentos ou pelas rochas mais friáveis do embasamento, sendo os solos geralmente profundos e bem desenvolvidos. Este tipo de UAN pode ser observado na figura 06 a seguir.

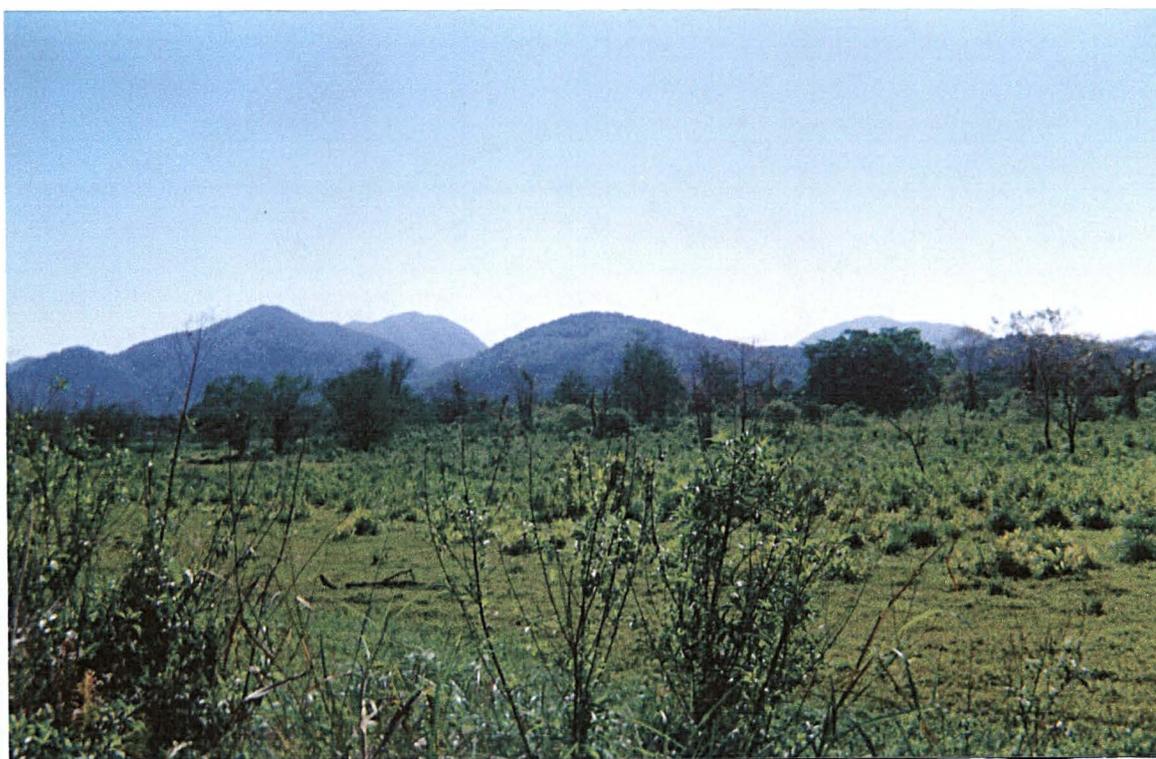


Figura 06 - UAN de Colinas: Colinas arredondadas com vertentes convexas na região de Planície Litorânea (Foto do autor- 1999).

### Unidade Ambiental Natural de Morros

Inclusos na Sub-região de Planícies Litorâneas, os Morros são elevações que sobressaem nas planícies, sendo sustentados pelo embasamento cristalino e com declividades

em trono de 12 a 20% podendo, em alguns casos, atingir declives superiores a 45% em suas encostas mais íngremes.

Quanto aos tipos de solos, esses variam conforme o seu desenvolvimento e profundidade, a partir da declividade e do material de origem (figura 07).

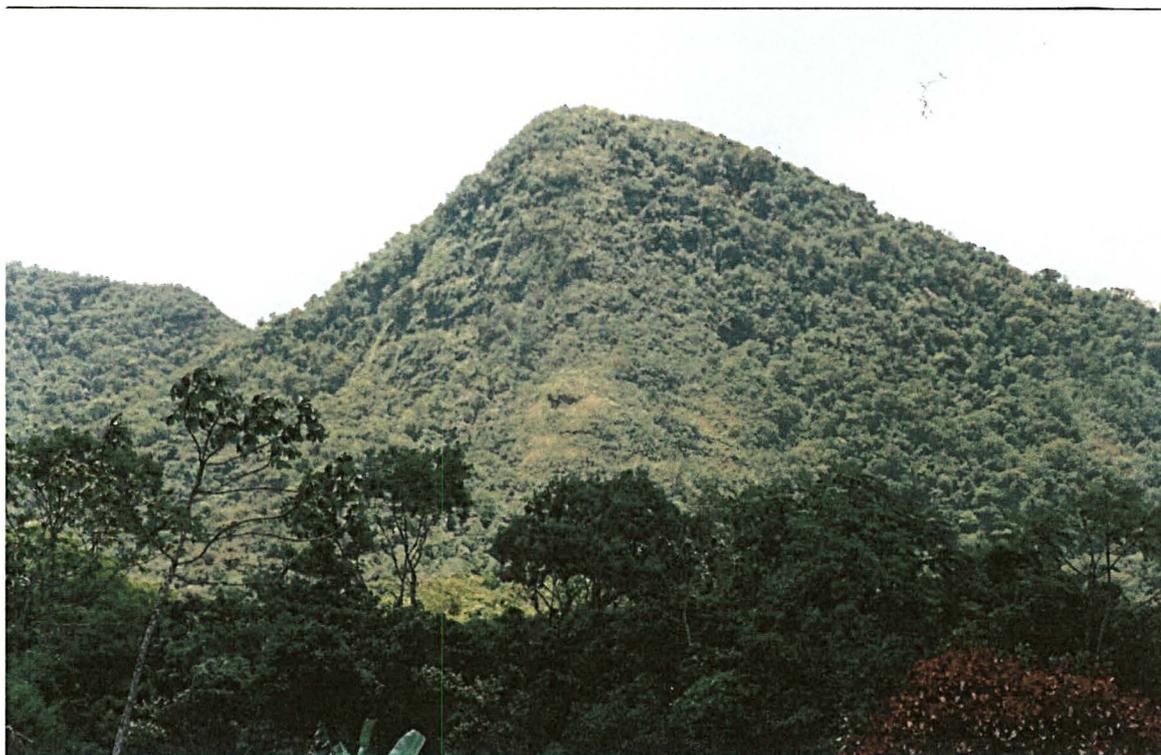


Figura 07- UAN de Morros: Morros que sobressaem na região de planície, com encostas íngremes (Foto do Autor- 1999).

#### Unidade Ambiental Natural de Planície Aluvial e de Planície de Restinga

Tanto a UAN da planície aluvial como a da planície de restinga possuem relevo plano a suave ondulado, com declividades pouco acentuadas, entre 0 a 5% e altitudes inferiores a 40 metros. As cotas mais elevadas ocorrem nos topos isolados, cujas formas geralmente aparecem arredondadas e alongadas.

A litologia da área é formada por sedimentos recentes do Quaternário. Quanto aos solos, predominam dois tipos: o Cambissolo Distrófico, menos suscetível à erosão e o Hidromórfico, que apresenta problemas de encharcamento, em função do lençol freático muito alto, sendo propício a alagamentos.

Segundo BIGARELLA (1978), as planícies Aluviais são originárias dos depósitos de sedimentos que os rios eram obrigados a abandonar, dando o novo nível de base, durante o período de mar baixo, quando grande parte da plataforma continental ficava emersa, sendo sulcadas por esses rios.

O compartimento das planícies aluviais aparece principalmente na parte oriental da área das bacias e corresponde às margens do rio Nhundiaquara, sendo composto por diversas formas fluviais, tais como terraços, planícies de inundação e rampas de colúvio. A figura 08 ilustra a UAN de planície aluvial.

A planície de restinga, segundo BIGARELLA op. cit.; foi formada após o término de uma transgressão marinha, quando o mar começava a abaixar novamente, e iam sendo depositados sedimentos junto à linha de costa. Esse compartimento, como o da Planície Aluvial, situa-se na parte oriental da área em estudo.



Figura 08 – UAN de Planície Aluvial: Foz do Rio Marumbi próximo a cidade de Morretes, com margem larga e relativamente assimétrica, podendo observar a formação de pequenas ilhas por depósitos fluviais.

(Foto do Autor 1999).

## Unidade Ambiental Natural de Planalto Ondulado

Localiza-se à sudoeste da área das bacias, com declividade bem variada de 5% a 30% e com altitude de 840 a 1.050 metros, proporcionando à área, um padrão de relevo mais rebaixado com colinas e cristas arredondadas. As vertentes aparecem predominantemente de forma convexa, porem destacam-se vertentes côncavas-convexas intercalando-se com as convexas (figura 09).

A litologia deste compartimento é composta na sua maioria por migmatitos, aparecendo também, andesitos e dacitos. O solo é raso e pouco desenvolvido, do tipo Ca1 em transição com o Ca3.

A drenagem possui padrão dendrítico, sendo bem elevada por toda a extensão deste compartimento. Os rios são encaixados nos vales, sendo estes geralmente em formas de calhas.

Quanto à erosão, predomina a linear (grotões), sendo pouco acentuada a erosão laminar. Nas proximidades da BR-277 verifica-se a presença de cicatrizes antrópicas associada às atividades de mineração e aos cortes da estrada.



Figura 09- UAN de Planalto Ondulado: Observa-se um relevo mais rebaixado que as regiões de Serras, com colinas arredondadas e vertentes convexas (Foto do autor 1999).

### 1.2.2 Aspectos Geológicos

Na área de abrangência das bacias em estudo, como de todo município de Morretes, predominam rochas metamórficas e ígneas do Pré-Cambriano, correspondendo aos migmatitos e granitos, cortados por intrusão de dique de diabásio do mesozóico, além dos andesitos e dacitos em menor proporção, que fazem parte do chamado complexo cristalino. Na área são encontrados também, depósitos recentes do quaternário como aluviões, coluviões, sedimentos areno silticos argilosos de baía e depósitos de talus (figura 10). A descrição dos tipos litológicos mapeados na região em estudo é apresentada a seguir.

**Migmatitos:**

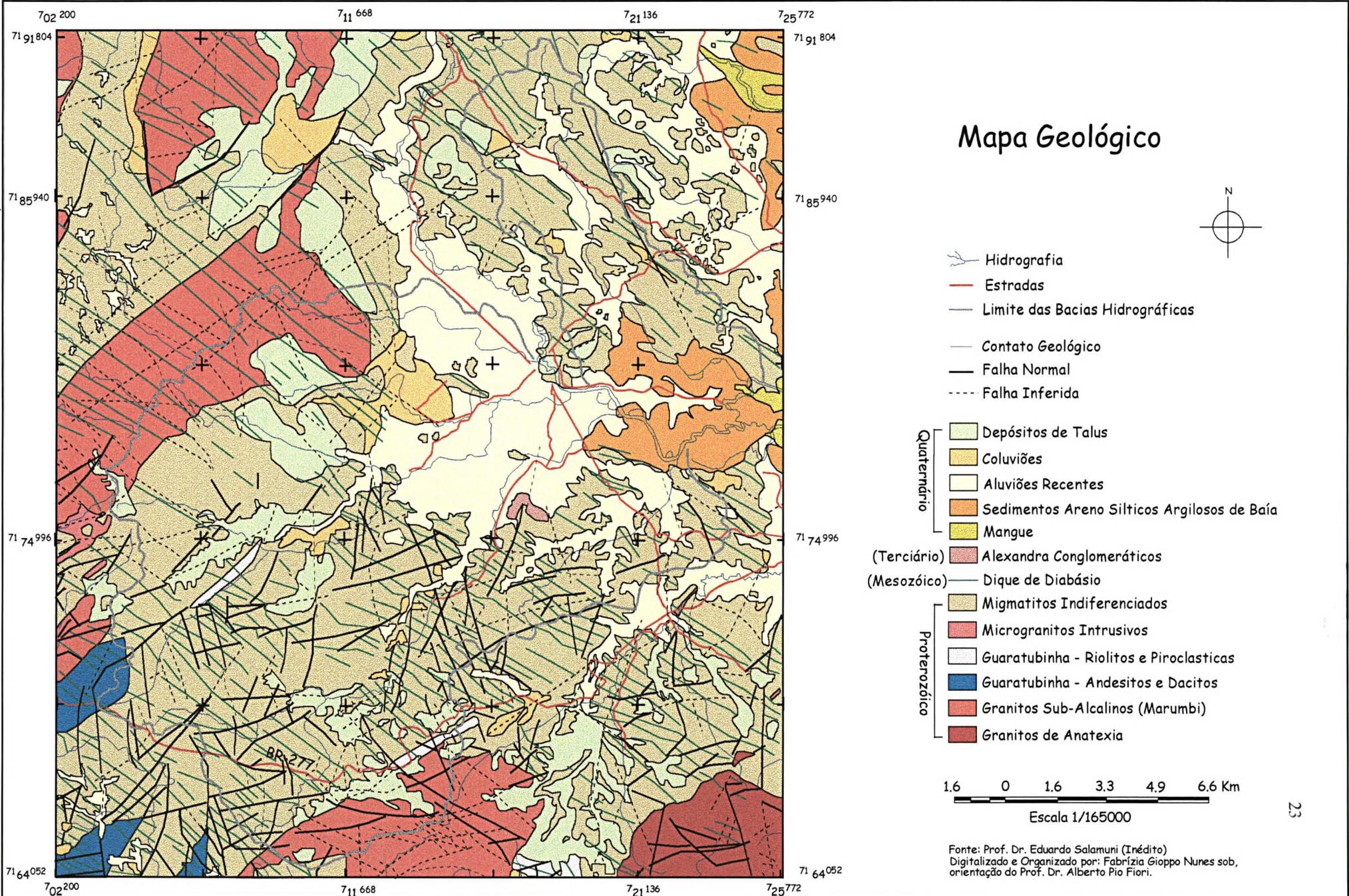
De acordo com FUCK *apud* BIGARELLA (1978), os migmatitos na Serra do Mar, distinguem-se entre os homogêneos e os heterogêneos. Como essa separação é arbitrária, pois não leva em consideração o caráter genético e nem a transição detalhada entre um migmatito e outro, não adotou-se a separação dos mesmos durante a confecção da carta temática de geologia, por falta de um melhor detalhamento.

**Migmatitos heterogêneos:**

Segundo CORDANI & GIRARDI (1967), os migmatitos heterogêneos (*epibolitos*) apresentam uma variedade litológica e estrutural muito grande, existem em muitos casos alternâncias com faixas de migmatitos homogêneos, onde a transição é completa, de modo que os limites assinalados entre estas duas áreas de ocorrência são sempre arbitrários e condicionados pela maior ou menor frequência de um ou de outro tipo. Assim freqüentemente, podem ser encontrados enbrechitos nas áreas de ocorrência de epibolitos, e vice-versa.

Macroscopicamente, os migmatitos heterogêneos caracterizam-se pela nítida alternância entre bandas máficas e félsicas de aspecto granítico ou pegmatítico. As faixas máficas (escuras) são compostas principalmente por biotita, epidotos, minerais opacos,

Figura 10 - Mapa Geológico da Área de Estudo



muscovita, titanita e apatita. Os filões félsicos (claros) são constituídos por quartzo, feldspato potássico e plagioclásio oligoclásio-andesina. Esse tipo de litologia é principalmente encontrada, na região de Piraquara e na porção norte do município de Morretes.

#### Migmatitos homogêneos:

Os migmatitos homogêneos (*embrechitos*) encontra-se em sua maioria, a partir da porção central do município de Morretes até o extremo sul da bacia do Marumbi, ou seja, entre o granito Marumbi e proximidades da BR- 277. As alternâncias de faixas claras ou escuras quase não existem, e quando se apresentam são muito irregular e difusas. Possuem aspecto granitóide e granulação média a grossa. Nesse tipo de rocha as cores claras prevalecem em razão da pequena porcentagem de máficos (CORDANI & GIRARDI, 1967, op. cit.).

Minerologicamente, os migmatitos homogêneos são muito semelhantes às variedades claras dos migmatitos heterogêneos, podendo ser chamados também de biotita gnaisses, ou gnaisses leucráticas. Os principais minerais félsicos constituintes são: quartzo, feldspato potássico e plagioclásio. Biotita é o mineral máfico mais comum; existem também quantidades subordinadas de hornblenda.

#### Granitos Sub-Alcalinos (Marumbi):

Três maciços graníticos denominados: Graciosa, Anhangava e Marumbi, foram identificados por MAACK (1961), na região de Morretes e seus arredores os quais mantêm contatos por falhas entre si.

No perímetro das bacias em estudo, encontra-se apenas o granito denominado Marumbi, que compreende a Serra do mesmo nome. Esse granito apresenta-se homogêneo, em contraste com a grande heterogeneidade do maciço Graciosa e Anhangava, sendo constituído por rochas hipidiomórficas, de granulação média, com textura equigranular milimétrica. Sua coloração predominante é cinza claro, às vezes avermelhada.

Os minerais dominantes são quartzo, feldspato potássico, plagioclásio e biotita. A sua composição modal, conforme MAACK (1968), indica que a rocha não é granito alcalino, e

sim uma biotita granito ácido. A composição do seu plagioclásio e do feldspato potássico evidencia uma acentuada tendência alcalina.

#### Diques de Diabásio:

Intrusões de diques de diabásio associados ao vulcanismo mesozóico estão presentes em toda a área das bacias, cortando tanto os granitos como os migmatitos. Essas intrusões apresentam disposição vertical ou quase vertical com relação às rochas encaixantes, preenchendo fraturas de direção preferencialmente noroeste.

Em decorrência de sua maior resistência em relação principalmente aos migmatitos encaixantes, os diques constituem cristas alongadas que ressaltam na topografia formando vales nos maciços graníticos. Possuem cor variada de cinza escuro a preto, granulação média a fina.

De acordo com CORDANI & GIRARDI (1967), as intrusões de diques possuem grandes espessuras, cuja ordem de grandeza oscila ao redor de 100 metros; porém, variam entre 20 a 50 metros na maioria dos casos. Plagioclásios e piroxênios são os minerais predominantes, aparecendo em menor quantidade hornblenda, biotita, epídoto, opacos, quartzo, feldspato potássico, apatita e nontronita.

#### Depósitos Recentes do Quaternário:

##### Coluviões e Aluviões:

Os depósitos de colúvios aparecem no sopé das vertentes da Serra do Mar, e os depósitos aluvionares ao longo dos vales dos principais fluxos d'água e sobre a planície aluvial do rio Nhundiaquara, situada à nordeste da área de estudo. Ambas as litologias são constituídas por sedimentos não consolidados, de origem predominantemente terrígena. Em grande parte, trata-se de siltes e argilas que formaram depósitos coluviais, caracteristicamente sem estrutura sedimentar, oriundos de deslizamentos de materiais em grande escala provenientes do profundo manto de decomposição das rochas do substrato. Por vezes, aparecem aluviões fluviais de caráter mais arenoso e leito de cascalho. Tal fenômeno ocorre principalmente ao longo dos cursos dos rios (CORDANI & GIRARDI, *op. cit.*).

Sedimentos areno silticos argilosos de baía:

Resultantes do preenchimento dos sedimentos da baía de Paranaguá, são de origem marinha, depositados sobre o embasamento cristalino. Na área aparecem sobre a região de planícies, a noroeste das bacias em estudo.

Depósitos de talus:

Os depósitos de talus são observados entre as zonas escarpadas da Serra do Marumbi. Constituem-se de blocos angulares e subarredondados de diversos tamanhos, imersos em matriz siltítica ou argilosa. Neste tipo litológico não aparecem estruturas sedimentares.

### **1.2.3 Aspectos Pluviométricos**

Conforme FIORI (1995<sup>a</sup>), a precipitação é um importante fator no controle do ciclo hidrológico e, portanto, da regulagem das condições geomorfológicas de uma determinada região. A quantidade relativa de precipitação, seus regimes sazonais ou diários e a intensidade das chuvas individuais são algumas das características que afetam a natureza e a magnitude do trabalho geomorfológico em bacias de drenagem.

Ainda segundo o mesmo autor, existe um grade vínculo entre chuvas intensas e escorregamento, com diversas causas que levam a esse resultado, como aumento do grau de saturação do solo, que leva a conseqüente perda da coesão aparente; desenvolvimento de pressão neutra, ou de poros, no interior do solo; aumento do peso do solo pelo acréscimo do grau de saturação; desenvolvimento de pressões hidrostáticas sobre a massa de solo ou rocha pelo acúmulo de água em fendas ou trincas; aumento de percolação devido ao aumento do fluxo subterrâneo da água, entre outros. A água da chuva é considerada como um importante fator de desenvolvimento dos fenômenos de instabilidade em encostas.

Para CAPUTO (1988), as causas de um escorregamento estão relacionadas ao aumento do peso do talude (incluindo as cargas aplicadas) e a diminuição da resistência ao cisalhamento do material. A concomitância desses fatores nas estações chuvosas ou pouco depois, onde a saturação aumenta o peso específico do material e o excesso de umidade, reduz

a resistência ao cisalhamento pelo aumento da pressão neutra, explica a ocorrência da maioria dos escorregamentos nos períodos de grande precipitação pluviométrica.

Segundo GUIDICINI & NIEBLE (1983), existem diversos trabalhos nacionais que apresentam ensaios de correlação entre pluviosidade e escorregamento, como por exemplo, Pichler (1957), Barata (1969), Vargas (1970) e Nunes (1969). Tratam-se de estudos de correlações pontuais, onde a ocorrência dos escorregamentos é associada ao registro pluviométrico diário, geralmente elevado, decorrente de determinado episódio de chuva.

Entrando em concordância com diversos autores que tratam do assunto em questão, não se deve deixar de levar em consideração que a chuva é um dos fatores necessários, mas não único para que ocorra o escorregamento, sendo este ocasionado por uma combinação da atuação de diversos outros fatores como pedológico, geológico, geomorfológico e biológico.

#### 1.2.3.1 Dados de Pluviosidade

No que se refere às precipitações pluviométricas da área em estudo, os dados fornecidos pela SUDERHSA, de diferentes estações distribuídas em suas proximidades, comprovam que a oferta hídrica é bem elevada, sendo mais pronunciada nos meses de verão, caindo de forma brusca nos meses de inverno, com máximas em janeiro e mínimas em junho ou/e agosto. Esses dados vem a confirmar os cuidados que devem ser atribuídos aos meses de verão, onde provavelmente ocorrem os maiores episódios de escorregamentos.

A seguir é apresentada uma breve análise dos gráficos que representam as precipitações mínima, máxima e média mensais das estações situadas próximas a área de estudo, durante um período médio de 18 anos (figuras 11, 12 13 e 14).

Os resultados fornecidos pelos gráficos mostraram que, na estação Vêu da Noiva (02548002), durante o período de 1980 a 1996, o maior índice pluviométrico ocorreu no mês de janeiro, tendo uma média em torno de 426mm. A máxima registrada neste mês foi de 890mm em 1983, e a mínima de 83mm em 1984, gerando um desvio padrão da máxima com a mínima em torno de 270mm.

Os meses que menos chovem nesta estação são: junho com uma média de 196mm, sendo a máxima registrada em torno de 482mm no ano de 1983 e a mínima de 53mm no ano

de 1980 com um desvio padrão de 100mm; e o mês de agosto com uma média de 194mm, sendo a máxima registrada de 449mm em 1992 e a mínima de 35mm em 1984 com um desvio padrão de 110mm.

Na interpretação da representação gráfica das chuvas no período de 1980 a 1998 da Estação São João da Graciosa (02548047) observa-se que, o mês que mais chove é o de janeiro, com uma média de 398mm. A sua máxima registrada foi de 776mm em 1989 e a mínima deste mês foi, de 157mm em 1992, com o desvio padrão de 176mm.

Junho e agosto são os meses que menos chovem, tendo o mês de junho uma média de 127mm, com uma máxima registrada de 395mm em 1991 e uma mínima de 10mm em 1986, com desvio padrão de 94mm. O mês de agosto possui uma média de precipitação em torno de 115mm, sendo a máxima de 269mm em 1990 e a mínima de 11mm em 1985, com o desvio padrão de 77mm.

A Estação Marumbi (02548027) durante os anos de 1980 a 1998 apresentou a sua maior oferta pluviométrica no mês de janeiro, com uma média de 303mm. A máxima registrada do mês de janeiro foi de 576mm no ano de 1989, e a mínima foi de 90mm no ano de 1982. O desvio padrão entre a máxima e a mínima, observa-se em torno de 138mm.

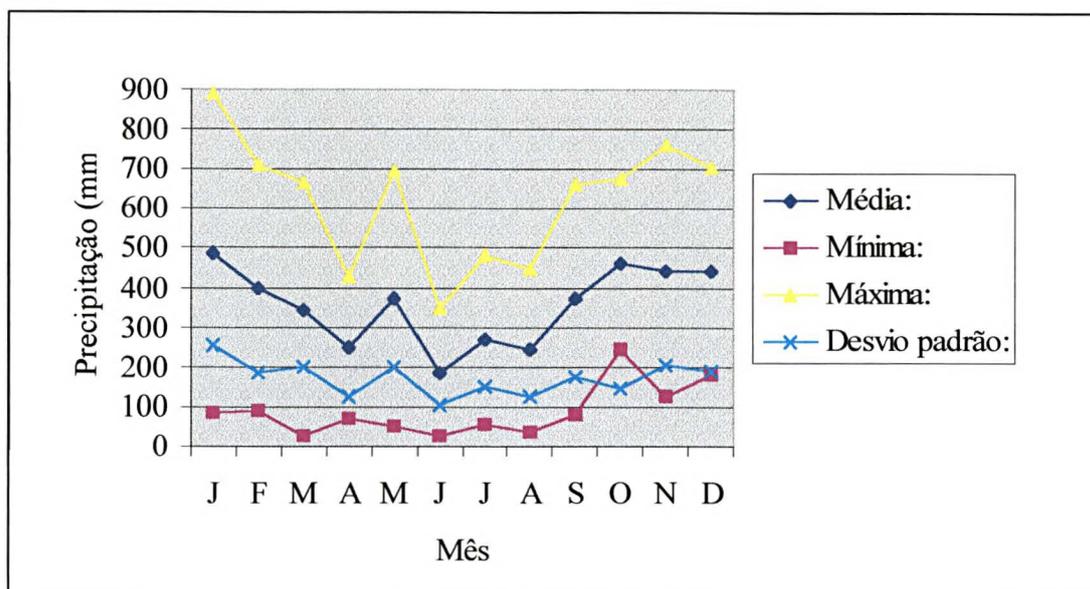
Nesta estação, o mês que menos chove é o de agosto, apresentando uma média de 87mm, com máxima registrada de 260mm no ano de 1984 e mínima de 1mm, no ano de 1985. O desvio padrão da máxima com a mínima é de 70mm.

A análise gráfica da Estação Morretes (02548000) de 1980 a 1998 mostra que o mês de janeiro, como nas demais estações, também é o que possui o maior registro de chuvas, com uma média pluviométrica de 354mm, sendo a máxima de 661mm em 1989 e a mínima de 103mm em 1989. O desvio padrão mostra-se em torno de 147mm.

O mês menos chuvoso é o de junho, possuindo a média pluviométrica em torno de 108mm, sendo a máxima de 242mm em 1983 e a mínima de 7mm em 1986, com um desvio padrão de 64mm.

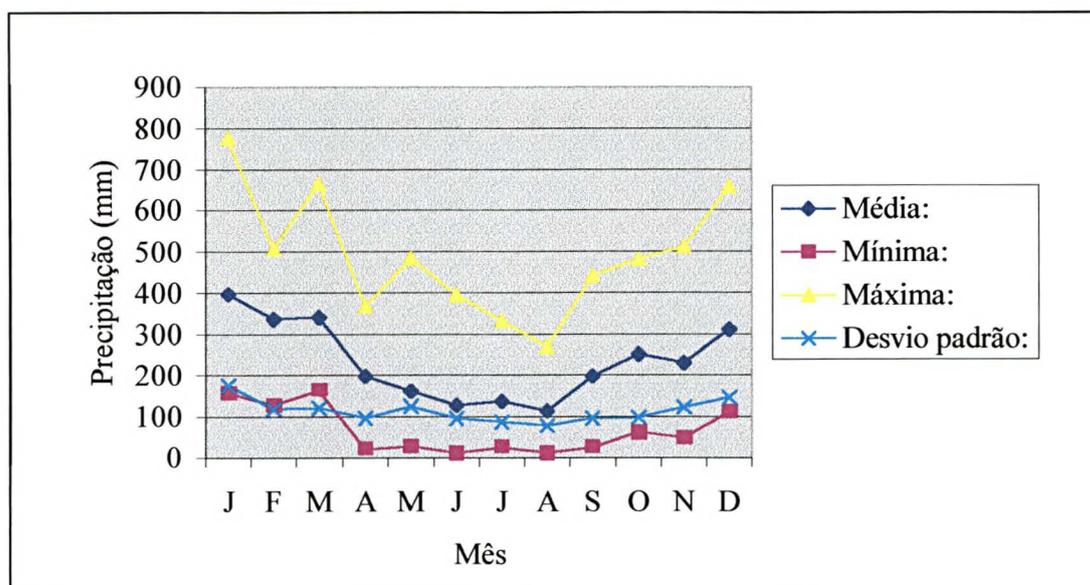
Pela análise acima, pode-se evidenciar o elevado teor pluviométrico na área das bacias, com média mensal superior a 300mm, podendo ocorrer episódios de chuvas intensas que atingem uma máxima mensal de até 890mm, como o registrado na Estação Veu da Noiva.

Figura 11 - Gráfico do Índice de Precipitação na Estação Vêu da Noiva a 680m de altitude  
(Período: 1980-1996)



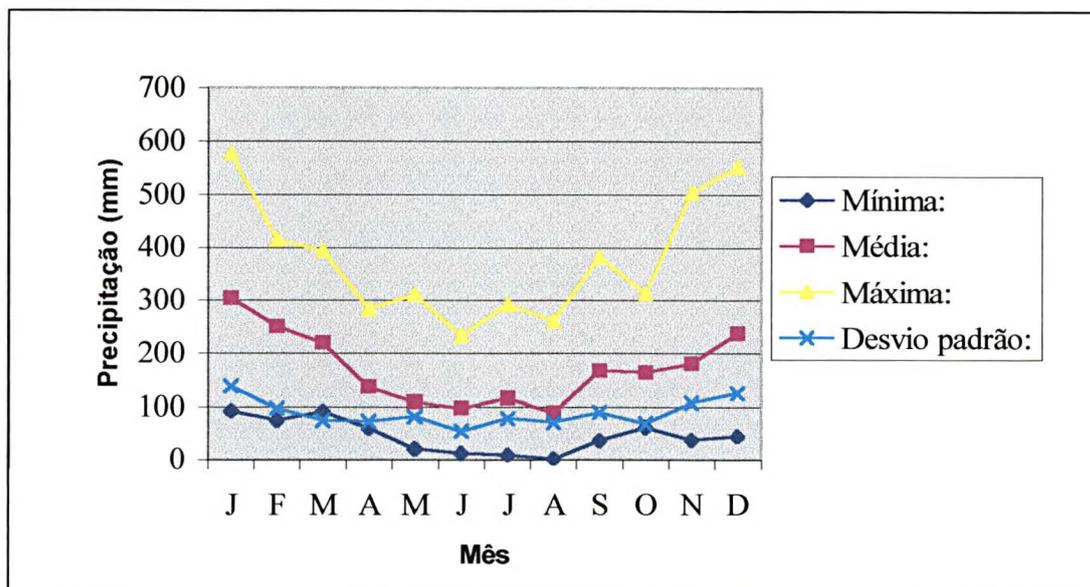
Fonte: SUDERHSA.

Figura 12 - Gráfico do Índice de Precipitação na Estação São João da Graciosa a 159m de altitude (Período: 1980-1998)



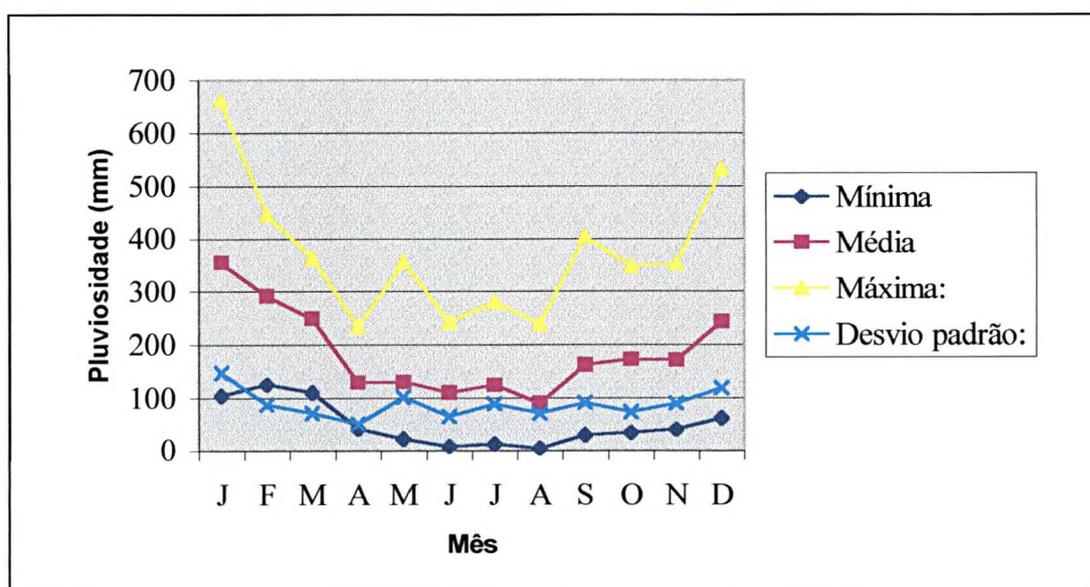
Fonte: SUDERHSA.

Figura 13 - Gráfico do Índice de Precipitação na Estação Marumbi a 60m de altitude  
(Período: 1980 a 1998).



Fonte: SUDERHSA.

Figura 14 - Gráfico do Índice de Precipitação na Estação Morretes a 8m de altitude  
(Período: 1980-1998).



Fonte: DNAEE.

#### 1.2.4 Aspectos Pedológicos.

Tendo por consideração que os solos representam o principal objeto de trabalho do geólogo na área de Geologia de Engenharia e Meio Ambiente, uma vez que os processos do meio físico (erosão, escorregamento, assoreamento, contaminação, colapsos e subsidências, recalques, etc.) ocorrem predominantemente nos solos e por eles são condicionados (KERTZMAN & DINIZ, 1995), optou-se, neste trabalho, por uma melhor descrição dos mesmos, uma vez que, os solos vão constituir uma das principais variáveis na aplicação da equação de fatores de segurança das encostas.

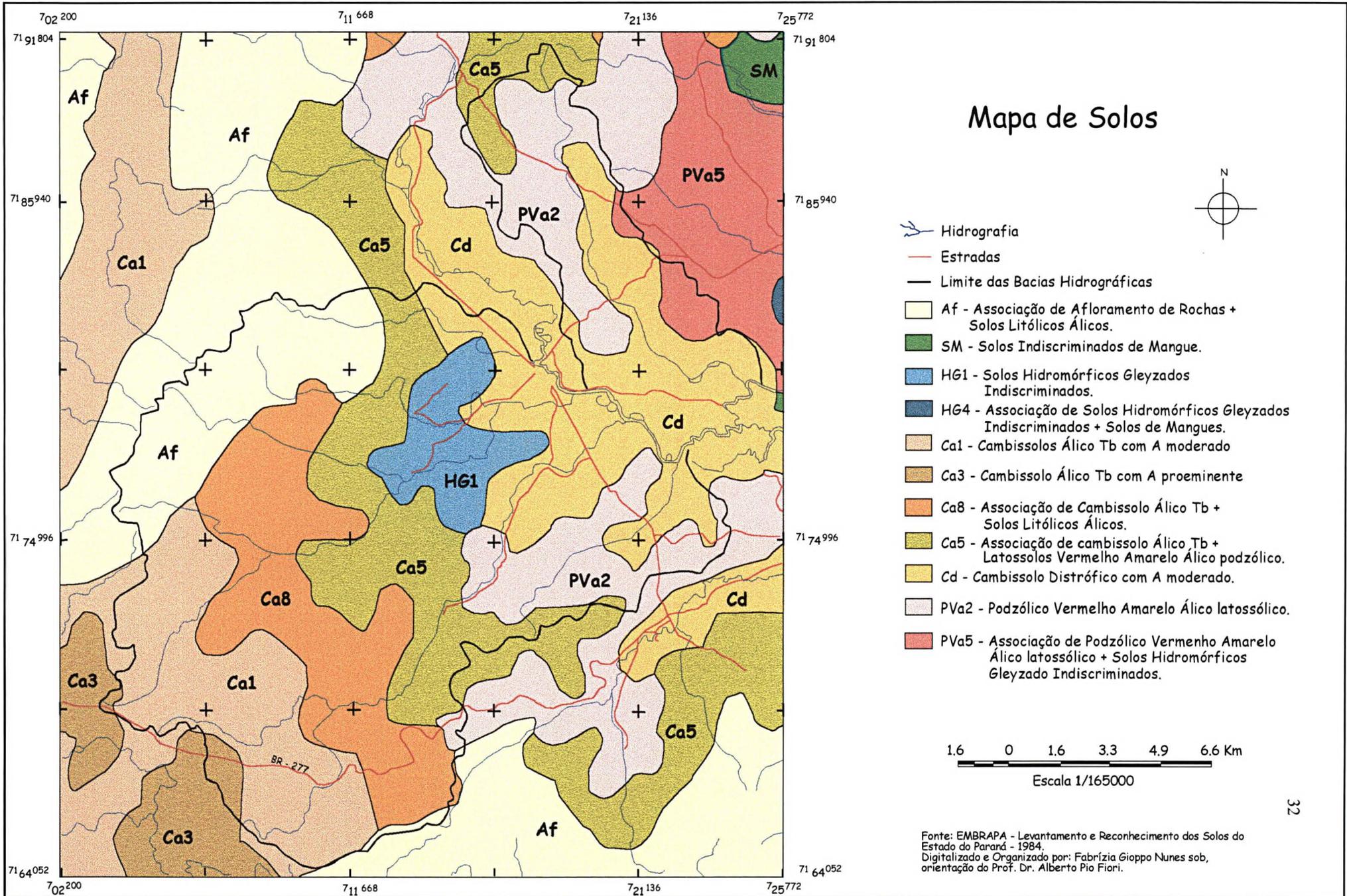
Segundo KERTZMAN & DINIZ *op. cit.*, os solos são produtos da interação rocha/relevo/clima e, portanto, sintetizam as suas principais características. Assim, conhecendo-se o solo, pode-se inferir sobre o material de origem (rocha – mãe), a forma do relevo, a declividade, o sistema de drenagem, o comportamento hídrico e a suscetibilidade aos processos do meio físico.

Para a descrição e divisão das classes de solos e suas respectivas unidades apresentadas neste trabalho, levou-se em questão as várias condições ambientais que determinam as características peculiares de cada solo. Como condições ambientais apresentam-se: relevo, declividade, cobertura vegetal, clima e materiais de origem. Foi levada em consideração também a atividade da argila, os tipos de horizontes, a profundidade do perfil, além das condições de uso e suscetibilidade a erosão.

A descrição dos solos da área foi baseada no trabalho da EMBRAPA & IAPAR (1984), e de LARACH & RAUEN *apud* BIGARELLA (1978). Dessa forma, segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos da EMBRAPA, a área em estudo apresenta as classes de solos do tipo: CAMBISSOLOS ÁLICO (Ca), CAMBISSOLOS DISTRÓFICO (Cd), PODZÓLICO VERMELHO AMARELO (PVa), SOLOS HIDROMÓRFICOS GLEYZADOS INDISCRIMINADOS (HG), AFLORAMENTOS DE ROCHAS (Af), SOLOS LITÓLICOS ÁLICOS (Ra) e LATOSSOLO VERMELHO AMARELO ÁLICO (LVa), associados ou não.

A figura 15 mostra o mapa de solos da área em estudo com as suas respectivas unidades de solos.

Figura 15 - Mapa de Solos da Área de Estudo



Durante o trabalho, não se optou pela utilização do novo sistema brasileiro de classificação de solos da EMPRAPA, devido a este possuir correlação direta, apenas até o primeiro nível categórico, com o mapeamento realizado pela EMPRAPA & IAPAR (1984). Para a classificação do demais níveis categóricos, conservando o detalhamento de cada unidade de solos mapeada, precisaria de um maior reconhecimento de algumas características peculiares desses solos, não encontradas nas bibliografias, como fração argila, saturação por base e caráter de alumínio.

Descrição dos Solos:

#### 1.2.4.1 CAMBISSOLOS:

Esta classe compreende solos minerais não hidromórficos, com horizonte *B* câmbico. Os Cambissolos são moderadamente a bem drenados, com seqüência de horizontes *A*, *B*, *C*, com transição clara entre eles.

Quanto ao desenvolvimento pedogenético, são solos com certo grau de evolução, mas não o suficiente para a meteorização completa de minerais primários, de fácil intemperização.

A maior parte dos perfis examinados são pouco profundos, de 50 a 100 cm. São solos álicos, isto é, extremamente ácidos, com alto teor de alumínio trocável e com baixa reserva de nutrientes para as plantas.

A textura ao longo do perfil é muito uniforme, embora entre um perfil e outro da mesma classe possa ocorrer uma grande variação na textura em função do substrato rochoso. Na área de Morretes predominam as classes texturais argila, franco argiloso e muito argiloso.

Os Cambissolos são solos naturalmente pouco estáveis aos problemas geotécnicos. Quando expostos em cortes e taludes, tornam-se extremamente erodíveis e friáveis, desenvolvendo sulcos, ravinas e solapamentos.

Como principais unidades de solos pertencentes a esta classes foram identificados e mapeados na área de estudo os seguintes tipos:

- CAMBISSOLO ÁLICO Tb com A moderado - (Ca1):

Compreende a porção sudoeste da área da bacia do Marumbi, o Cambissolo Ca1 é formado sobre um substrato predominantemente de rochas migmatíticas, pertencentes ao Complexo Cristalino.

O solo desta unidade ocorre geralmente em relevo ondulado, com topos arredondados, vertentes e vales em “vê”. Podem ser encontrados também em relevo forte ondulado.

Sua vegetação típica é a Floresta Ombrófila Densa Altimontana, com uma notável falta de araucária, que aparece apenas na foz do rio Ipiranga, sendo de aspecto mal conformado na área de transição com a Floresta Ombrófila Mista do Primeiro Planalto.

A utilização para a agricultura é restrita, principalmente devido à sua baixa fertilidade natural, aliada aos elevados teores de alumínio trocáveis. Outras desvantagens desse solo para a agricultura são a baixa espessura dos perfis e a topografia com declives elevados. Os danos causados pela erosão são grandes, principalmente se houver uma prévia remoção da cobertura vegetal.

Recomenda-se que a melhor utilização desse solo seja feita com pastagens plantadas, ou então, com silvicultura, podendo também se remeter à preservação permanente da paisagem natural.

- CAMBISSOLO ÁLICO Tb com A proeminente - (Ca3):

Situada no extremo sudoeste da área de estudo, junto ao limite da bacia do Marumbi, esta unidade é desenvolvida a partir dos produtos da meteorização de migmatitos, pertencentes ao Complexo Cristalino da Serra do Mar. Aparece sobre uma morfologia de relevo forte ondulado, com declives superiores a 15%.

A vegetação predominante é do tipo campo subtropical, interrompida por áreas de vegetação florestada.

Quanto à sua utilização, são solos inaptos para a agricultura e regulares para a silvicultura. O material de origem pobre e a baixa quantidade de nutrientes contribuem para a baixa fertilidade natural. Além disso, contribuem para a baixa qualidade desse solo o seu alto teor de alumínio trocável e a alta susceptibilidade à erosão.

- Associação de CAMBISSOLOS ÁLICOS Tb + SOLOS LITÓLICOS ÁLICOS - (Ca8):

Esta associação de solos é desenvolvida a partir da meteorização de rochas migmatíticas, pertencentes ao Complexo Cristalino. Ocorrendo na parte centro sul da bacia hidrográfica do Marumbi, predomina nas superfícies de topografia muito movimentada, com declives muito inclinados e vertentes íngremes, geralmente com declividade de 30% a 40%.

A vegetação correspondente á essa unidade é a Floresta Ombrófila Densa Montana, apresentando uma precipitação bem elevada.

Tendo em vista a baixa fertilidade natural do solo, as altas declividades, com vertentes bem íngremes e os graves riscos erosivos associados, caso a cobertura vegetal seja retirada, essa associação, como um todo, torna-se inapta para qualquer tipo de uso agrícola e urbano, restringindo seu uso apenas á preservação da flora e fauna.

- Associação de CAMBISSOLOS ÁLICOS Tb + LATOSSOLOS VERMELHO- AMARELO ÁLICO podzólico - (Ca5):

Associada a um relevo regional montanhoso de vertentes íngremes, essa unidade de solos é desenvolvida nas baixas encostas da Serra do Marumbi. A vegetação é classificada como de Floresta Ombrófila Densa Submontana.

Aparece como uma faixa que se estende de norte a sul na porção central das bacias. A unidade Ca5 é formada a partir da decomposição de rochas migmatíticas e graníticas, com influência de material retrabalhado.

Embora de baixa fertilidade natural, essa associação de solos é mais profunda e menos suscetível à erosão do que o Ca1 e o Ca8, nas regiões de declive moderado. Essa associação como um todo, pode ser utilizada para cultura de subsistência, principalmente com culturas perenes, desde que sejam tomadas medidas de controle à erosão e correção da sua baixa fertilidade. Poderia, também, ser utilizada para pastagem plantada.

- CAMBISSOLOS DISTRÓFICO - (Cd):

Encontrada na área sobre a planície do rio Nhundiaquara, esta unidade de solos é desenvolvida a partir dos produtos provenientes da intemperização de sedimentos recentes do

Quaternário. Ocorre em relevo plano, ao longo dos rios, situando-se em áreas menos alagadiças que os Solos Hidromórficos, com drenagem imperfeita ou restrita.

O solo desta unidade caracteriza-se por possuir horizonte *A* moderadamente desenvolvido, com textura fina. Ocorre sob a Floresta Ombrófila Densa das Terras Baixas, ocupando as planícies aluviais dos rios onde a pedogênese foi suficientemente ativa e demorada para desenvolver um horizonte *B* câmbico nos sedimentos quaternário.

A sua utilização para a agricultura é restrita por ser de fertilidade baixa, porém não tanto como os Cambissolos Álicos. Entretanto, é o solo que melhor se apresenta na região para uso agrícola, o que mostra a preferência dos moradores em cultivá-lo. São intensamente utilizados para a produção de hortaliças e culturas de subsistência, sendo inaptos à cultura de ciclo longo.

Quanto à erosão, são os menos suscetíveis, visto ocorrerem em relevo plano, onde o escoamento das águas superficiais é praticamente nulo.

#### 1.2.4.2 PODZÓLICOS

Nesta classe estão compreendidos solos minerais não hidromórficos, com *B* textural, baixa capacidade de troca de cátions, seqüência de horizontes *A*, *Bt*, *C* e com variedades eutrófica, distrófica e álica.

São solos mediamente profundos, com variação de 1 até 2 metros de profundidade, bem drenados, podendo apresentar perfis com ou sem horizonte *A2*.

A coloração é bem variada entre as unidades desta classe, indo desde avermelhado-escuro até vermelho amarelo. Quanto à textura, a parte superficial do perfil é mais arenosa, seguida de um horizonte *B* de textura mais argilosa.

Quanto aos problemas geotécnicos, apresentam médio a alto potencial de desenvolvimento de processos erosivos, logo após a retirada da cobertura vegetal.

As principais unidades de solos desta classe, mapeadas na área são:

- **PODZÓLICO VERMELHO- AMARELO ÁLICO latossólico - (PVa2):**

Este solo é originado a partir dos materiais provenientes da meteorização de migmatitos, granitos e outras rochas do Complexo Cristalino. Encontra-se a nordeste e sudeste da área de estudo, sobre as bacias hidrográficas dos rios Sapetanduva e Passa-Sete.

Pode aparecer tanto em uma morfologia de relevo ondulado, com elevações de topos arredondados e vertentes convexas, como também em relevo forte ondulado de declives acentuados. A vegetação é do tipo floresta perúmida, com árvores de médio a grande porte.

A baixa fertilidade natural e a elevada saturação com alumínio atuam negativamente para a utilização deste solo, além da geomorfologia local. O uso de pastagens nas partes de relevo mais movimentado e de pastagens, ou mesmo agricultura, nas partes mais suaves, pode apresentar bons rendimentos, desde que os solos sejam devidamente manejados, pois apresentam um certo grau de susceptibilidade à erosão.

- **Associação de PODZÓLICO VERMELHO-AMARELO + SOLOS HIDROMÓRFICOS GLEYZADOS INDISCRIMINADOS - (PVa5):**

Os solos desta unidade ocorrem no extremo nordeste da área da bacia do rio Sapetanduva. O primeiro componente é formado a partir de materiais provenientes da decomposição de migmatitos, granitos e outras rochas do Complexo Cristalino e o segundo de depósitos litorâneos e paludais marinhos, do Holoceno.

Quanto a geomorfologia, o primeiro componente aparece em relevo ondulado e forte ondulado e o segundo, em relevo plano. A vegetação primária é do tipo floresta tropical perúmida, nas áreas do primeiro componente e tropical perenifólia de várzea, nas do segundo.

Os fatores de baixa fertilidade natural, elevada saturação de alumínio e susceptibilidade à erosão, além de um relevo bastante movimentado do primeiro componente, restringe-o para utilização na agricultura, sendo o uso de pastagens o mais indicado. Já no segundo componente, o excesso de água é o principal problema.

#### 1.2.4.3 SOLOS HIDROMÓRFICOS

São solos mal drenados ou muito mal drenados, formados em terrenos de relevo baixo (Planícies), com grande influência do lençol freático à superfície ou próxima dela. A má

drenagem pode ser verificada pela presença de cores cinzentas e mosqueadas nos horizontes subsuperficiais, devido ao fenômeno de oxi-redução. Em alguns casos, pode apresentar ainda acúmulo superficial de matéria orgânica.

Os solos Hidromórficos possuem horizontes *A* e *Bg*, em geral pouco profundo, de textura predominantemente argilosa.

Na área de estudo, esta classe é representada apenas por uma unidade mapeada:

- **SOLOS HIDROMÓRFICOS GLEYZADOS INDISCRIMINADOS - (HG1):**

Na área, a presente unidade encontra-se sobre a planície litorânea, em forma de uma pequena mancha na porção centro-leste das bacias em estudo.

Este solo é desenvolvido a partir da meteorização de sedimentos aluviais ou colúvio aluviais do Quaternário, ocorrendo nas partes baixas e abaciadas do relevo plano, sob a Floresta Ombrófila Densa Aluvial.

Quanto à fertilidade, são solos heterogêneos, apresentando diversos graus de saturação de base. A limitação ao uso é principalmente devida ao excesso d'água, que causa a falta de aeração. Pelas condições do relevo não são suscetíveis à erosão.

- **1.2.4.4 Associação de AFLORAMENTOS DE ROCHAS + SOLOS LITÓLICOS- (Af):**

Ocorre nas partes de relevo mais acidentado à noroeste da área em estudo. Essa associação de solos desenvolve-se sobre um substrato predominantemente granítico, com vegetação do tipo Floresta Ombrófila Densa Alto-Montana.

Sendo solos rasos, muito pouco evoluídos, aparecem com exposições de rochas nuas, ou com reduzidas proporções de materiais detríticos, grosseiros. São constituídos por largas porções de fragmentos, provenientes da degradação das rochas locais com algum material terroso.

Pela alta susceptibilidade à erosão, onde as forças erosivas impedem a acumulação dos produtos do intemperismo, essa área deve ficar restrita apenas à preservação da vegetação natural. Devido à sua localização geomorfológica, pois se situam em áreas geotecnicamente críticas. Sendo suscetível a quedas de blocos.

## **Capítulo III**

### **1. Processamento e Interpretação de Imagem Digital de Sensoriamento Remoto**

Os sistemas de processamento ou tratamento de imagens são destinados à extração de informações a partir de dados de Sensoriamento Remoto. Esta extração pode ser qualitativa, através da observação de imagens realçadas pelo sistema, ou quantitativa, através da utilização de procedimentos de classificação automática (ROCHA, 2000).

De acordo com o INPE (2000), o termo "Processamento Digital de Imagem" refere-se a um conjunto de técnicas e operações aplicadas sobre uma imagem digital, com o objetivo de facilitar a identificação e extração de informações a partir dela e sua posterior interpretação.

O processamento e a interpretação das imagens de satélite utilizadas no trabalho, foram realizados através de técnicas de tratamento digital de imagens, tendo como ferramenta básica o software SPRING, versão 3.4, lançado pelo INPE em junho de 2000. A extração das informações utilizando este sistema foi tanto qualitativa como quantitativa, com a saídas de dados através de mapas temáticos.

Para este trabalho utilizaram-se imagens do satélite Landsat-7 TM, obtidas no formato digital: A cena que cobre todo o perímetro da área em estudo, referente-se à órbita / ponto 220-077, com passagens em 26 de setembro de 1999 e 14 de setembro de 1986. Desta cena, foram adquiridas as bandas 3, 4 e 5 para os anos de 1999 e 1986. Sendo a banda 3 referente a faixa do visível-vermelho; banda 4 do infravermelho- próximo e a banda 5 do infravermelho-médio.

Da interpretação das imagens foram confeccionadas as cartas de uso e ocupação do solo, dos respectivos anos, visando a avaliação multitemporal dos diferentes padrões de ocupação, que implicam diretamente nos processos de esculturação das encostas.

## 1.1 Técnicas de Processamento de Imagem Digital no SPRING

As aplicações de algumas técnicas de processamento digital de imagem, utilizando o SPRING foram: técnicas de pré-processamento de imagens (correção geométrica e geo-referenciamento), técnica de realce de imagens (composição colorida e aumento de contraste) e técnica de classificação digital.

As técnicas utilizadas foram selecionadas conforme a qualidade das imagens adquiridas e do objetivo do trabalho, que foi o de mapear o uso e ocupação do solo, propiciando a análise multitemporal.

### 1.1.1 Técnica de Pré Processamento de Imagens

Para a leitura das imagens foi necessária a importação das mesmas para o sistema Spring, criando planos de informação (PIs) para cada banda adquirida, ou seja, os PIs das bandas 3, 4 e 5 da imagem de 1999 e os PIs das bandas 3, 4 e 5 da imagem de 1986.

#### 1.1.1.1 Correção Geométrica:

O processo de correção geométrica consiste na eliminação das distorções geométricas de uma imagem digital, reorganizando os seus pixels. Estes devem então possuir um novo posicionamento, correspondente a um determinado sistema de projeção cartográfica.

Segundo o INPE (2000), a correção geométrica pode ser obtida por técnicas de reamostragem dos pixels. As técnicas mais comuns são: vizinho mais próximo, interpolação bilinear e convolução cúbica. O sistema Spring utiliza, atualmente, a interpolação bilinear como opção de “default”.

#### 1.1.1.2 Geo-referenciamento:

A etapa de geo-referenciamento envolve uma transformação geométrica simples, relacionando as coordenadas da imagem (linhas, colunas) com as coordenadas de um sistema de projeção cartográfica qualquer.

Em ambiente Spring, a transformação geométrica é feita através de transformações polinomiais, que utiliza equações de 1º e 2º graus. As transformações polinominiais se encarregam de realizar o ajuste entre as coordenadas da imagem e as coordenadas do sistema de projeção cartográfica. Para tal tarefa é necessário estabelecer pontos de controle no terreno.

Os pontos de controles lançados para o registro das imagens são feições facilmente identificadas na carta topográfica e nas imagens a serem geo-referenciadas. Os pontos de controles foram localizados na carta topográfica, por suas coordenadas geográficas (latitude, longitude) e nas imagens, por suas coordenadas planas (x, y). Esses pontos foram obtidos geralmente nos cruzamentos de estradas e confluência de rios.

### 1.1.2 Técnica de Realce de Imagens

As técnicas de realce de uma imagem são aquelas voltadas à melhoria da qualidade visual das mesmas. Trata-se de dispor melhor dos dados para a sua análise visual, de tal forma que esses sejam mais evidentes na imagem. Incluem como técnicas de realce de imagem os procedimentos de melhoria de contraste, composições coloridas, mudanças de escalas e filtragem (CHUVIECO, 1990).

As técnicas de realce utilizadas no trabalho foram somente as de melhoria de contraste e composição colorida, pois as outras técnicas citadas não se mostraram necessárias para a interpretação dos dados.

#### 1.1.2.1 Composição colorida:

Para uma melhor observação dos diferentes tipos de alvos durante a classificação das imagens, gerou-se a composição colorida (RGB), através da combinação de bandas espectrais. Nas imagens trabalhadas criou-se a composição colorida RGB das bandas 3, 4 e 5. Uma cuidadosa seleção das mesmas fez-se necessário, para que a combinação tivesse as informações espectrais desejadas.

Como cada banda representa uma determinada resposta para cada tipo de alvo, a composição colorida foi feita a partir de bandas selecionadas, de acordo com as características

a serem realçadas, para o melhor mapeamento de uso e ocupação do solo, conforme pode ser verificada na tabela 02.

**Tabela 02: Principais Características e Aplicações das Bandas Adquiridas para o Mapeamento de Uso e Ocupação do Solo (Landsat 7)**

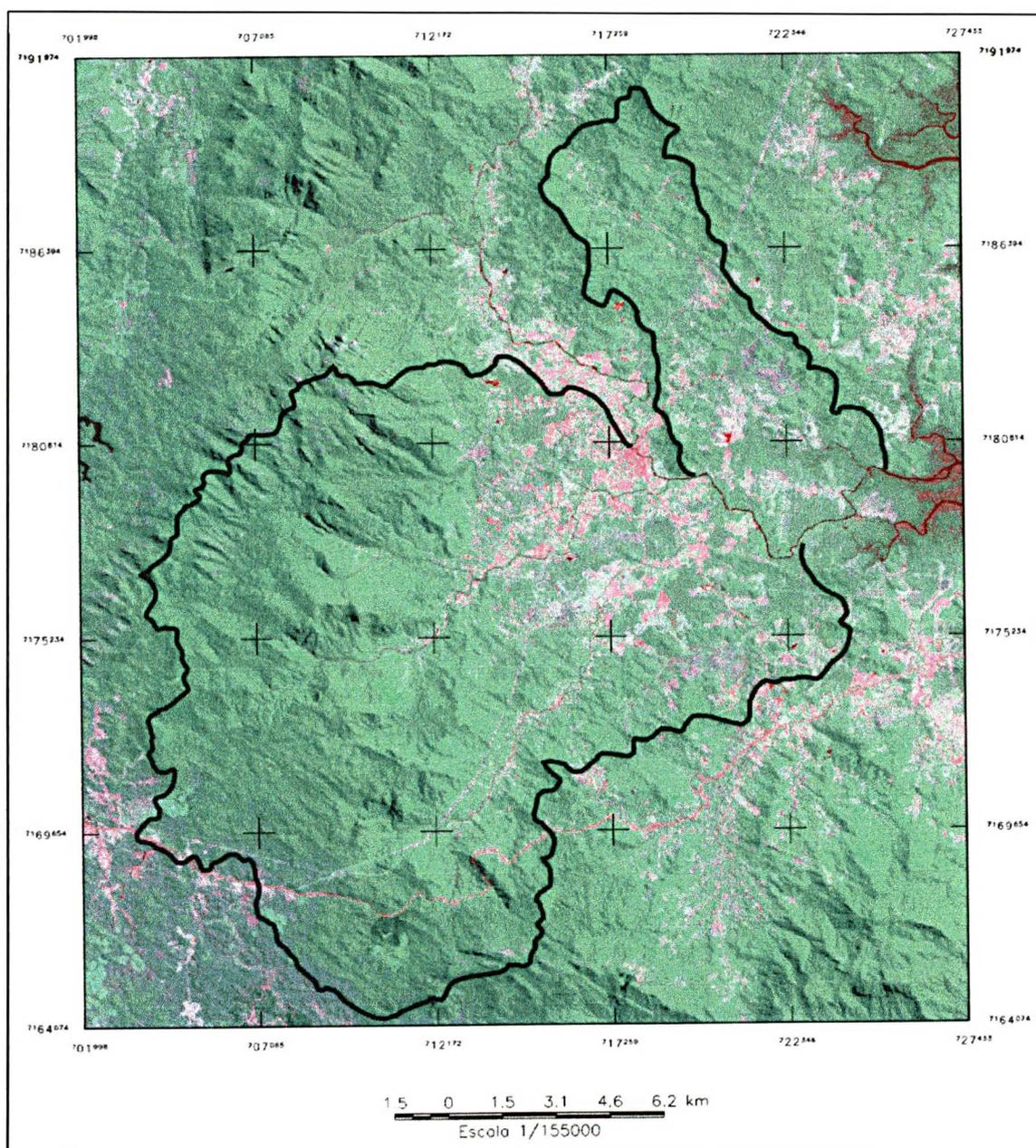
Banda	Intervalo ( $\mu\text{m}$ )	Principais características e Aplicações das Bandas do Landsat
3	0.63- 0.69	<p>A vegetação verde, densa e uniforme, apresenta grande absorção, ficando escura, permitindo bom contraste entre as áreas ocupadas com vegetação e aquelas sem vegetação (exemplo: solo exposto, estradas e áreas urbanas).</p> <p>Apresenta bom contraste entre diferentes tipos de cobertura vegetal (exemplo: campo, cerrado e floresta).</p> <p>É a banda mais utilizada para delimitar a mancha urbana, incluindo identificação de novos loteamentos.</p> <p>Permite a identificação de áreas agrícolas</p>
4	0.76- 0.90	<p>A vegetação verde, densa e uniforme reflete muita energia nesta banda, aparecendo bem clara nas imagens.</p> <p>Apresenta sensibilidade à rugosidade da copa das florestas (dossel).</p> <p>Serve para separar e mapear áreas ocupadas com pinos e eucalipto.</p> <p>Serve para mapear áreas ocupadas com vegetação, que foram queimadas.</p> <p>Permite a visualização de áreas ocupadas com macrófitas aquáticas.</p> <p>Permite a identificação de áreas agrícolas.</p>
5	2.08 – 2.35	<p>Apresenta sensibilidade ao teor de umidade das plantas, servindo para observar estresse na vegetação, causada por desequilíbrio hídrico.</p>

Fonte: Adaptado de Rocha (2000)

De acordo com o INPE (in. ROCHA 2000), a combinação das bandas 3, 4 e 5 mostra mais claramente os limites entre solo e água, com a vegetação mais discriminada, aparecendo em tonalidade de verde-rosa.

A figura 16 mostra a composição colorida (RGB) da área em estudo, gerada através da combinação de bandas espectrais em ambiente SIG.

Figura 16- Composição Colorida (RGB) das bandas 3, 4 e 5 da Imagem Landsat 7- TM  
órbita/ ponto 220-77 de 14/09/1999.



### 1.1.2.2 Aumento de contraste:

As manipulações de contraste visam facilitar a discriminação visual de características da cena com baixo contraste (NOVO, 1992). O contraste de uma imagem pode ser melhorado expandindo seu histograma de modo a distribuir as frequências de tonalidade de cores por todos os intervalos de níveis possíveis.

Segundo CRÓSTA (1992), a forma mais simples de se aumentar o contraste de uma imagem é através do aumento linear. Nele, a função de transferência é uma reta e apenas dois parâmetros são controlados: a inclinação da reta (controla a quantidade de aumento de contraste) e o ponto de interseção com o eixo “x” (controla a intensidade média da imagem).

As composições coloridas das imagens utilizadas no trabalho foram submetidas ao realce, através da técnica de ampliação linear de contraste, ajustando-se assim, à distribuição dos níveis de tonalidades de cores em relação a todos os intervalos possíveis de serem utilizados.

### 1.1.3 Técnica de Classificação Digital para a Produção das Cartas de Uso e Ocupação do Solo.

A classificação digital compreende o processo de extração de informações a partir de imagens, para reconhecer padrões e objetos homogêneos. O resultado final de um processo de classificação é uma imagem onde cada pixel contém a informação de uma classe, ou tema, associado ao ponto da cena correspondente. As técnicas de classificação podem ser divididas em classificadores por pixel ou regiões e podem levar em conta uma ou mais bandas da imagem (imagem multiespectrais). Os classificadores podem também ser divididos em supervisionados e não-supervisionados (INPE, 2000).

No presente trabalho adotou-se o procedimento de classificação por região, sobre imagens multiespectrais. Esse procedimento consiste na determinação de um conjunto de pixels vizinhos, com mesma informação espectral, para determinar as regiões homogêneas.

Para executar uma classificação por região, foi preciso extrair as regiões homogêneas da imagem, isso é, fazer a segmentação da mesma. No Spring existem dois algoritmos de segmentação: crescimento de região e detecção de bacia. Na segmentação das imagens usadas,

utilizou-se o algoritmo de crescimento de região, que consiste em um critério de similaridade espectral de pixel para determinar cada região.

Como classificador optou-se pelo Bhattacharya, que é um tipo de classificador supervisionado. Na classificação supervisionada, para cada classe de uso do solo que se desejou identificar, foi selecionado um conjunto de amostras dessa classe. Essas amostras serviram para determinar os parâmetros estatísticos usados no processo de decisão sobre a que classe um *pixel* pertence.

## 1.2 Coleta das Amostras de Cada Classe Identificada

Para a classificação das imagens coletou-se através dos polígonos gerados pela segmentação, diversas amostras representativas de cada classe estipulada. A coleta das amostras foi determinada conforme a refletância que cada alvo oferece, a composição colorida escolhida e também pelo devido controle de campo, como descrito no capítulo I.

Na RGB das bandas 3, 4 e 5 a classe de vegetação de porte arbóreo aparece bem distinguida, com tonalidade em verde escuro. A classe de vegetação herbácea e arbustiva possui uma tonalidade de verde, um pouco mais claro, do que a vegetação de porte arbóreo na sua fase mais desenvolvida. Na sua fase menos desenvolvida, as tonalidades apresentadas são de roxo escuro ou claro, verde claro mesclando com o roxo e azul claro mesclando com roxo.

Na classe de agricultura, a coloração aparece bem realçada, em tons de rosa claro e verde bem claro, sendo caracterizada por uma geometria mais definida dos seus polígonos. A coloração rosa apresentada na área urbana é um pouco mais escura do que a da área agrícola. Já o roxo escuro da classe de rochoso separa-se do roxo escuro da classe herbácea e arbustiva pela sua localização, em áreas de elevadas altitudes.

Após a definição das classes de uso e ocupação do solo, coleta de suas amostras e verificação destas em campo, deu-se a pós-classificação das imagens, refinando a qualidade das amostras, com base em uma matriz de confusão.

As figuras 17 a 24 ilustram o processo de classificação digital da Imagem RGB, através da sua segmentação com amostras representativas de cada classe estipulada, e respectivas fotografias retiradas durante o controle de campo.

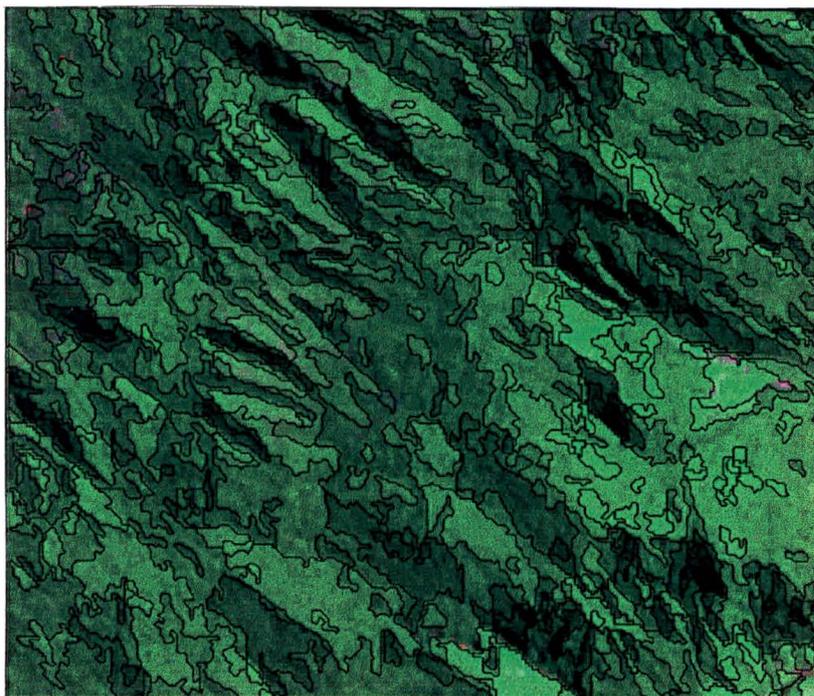


Figura 17- Exemplo de imagem segmentada com amostras da classe de vegetação de porte arbóreo. Na imagem, na composição 3, 4 e 5 a coloração desta classe é de verde escuro.



Figura 18- Observação do controle de campo da classe de uso e ocupação do solo de vegetação de porte arbóreo. (Foto do Autor- 2001).

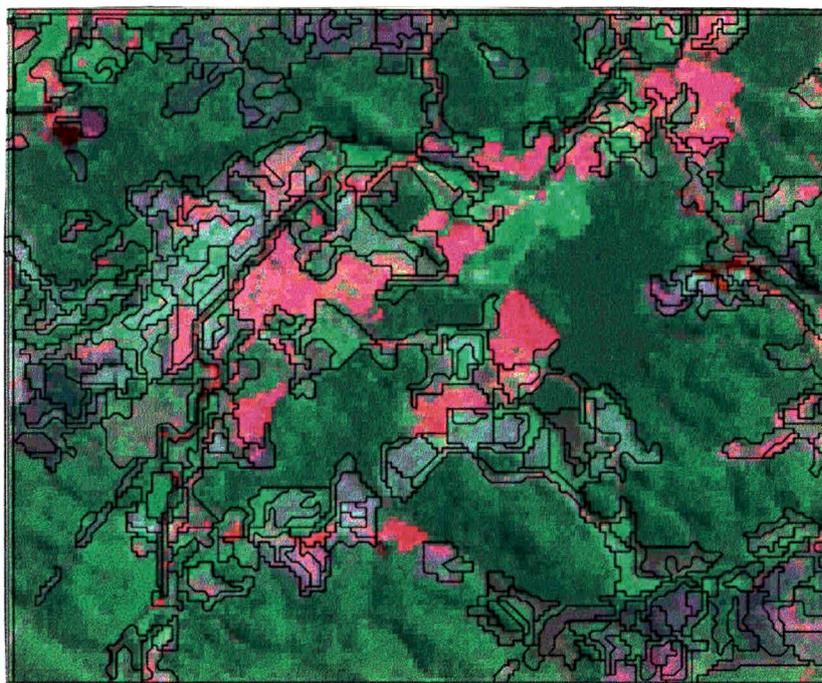


Figura 19- Exemplo de imagem segmentada com amostras da classe de vegetação de porte herbáceo e arbustivo. Na imagem, na composição 3, 4 e 5 a coloração desta classe é de verde claro, na sua fase mais desenvolvida. Na sua fase menos desenvolvida pode aparecer com tonalidades de roxo escuro ou claro, verde claro mesclado com roxo e azul claro mesclado com roxo.



Figura 20- Observação do controle de campo da classe de uso e ocupação do solo da vegetação de porte herbáceo e arbustivo. (Foto do Autor- 2001).

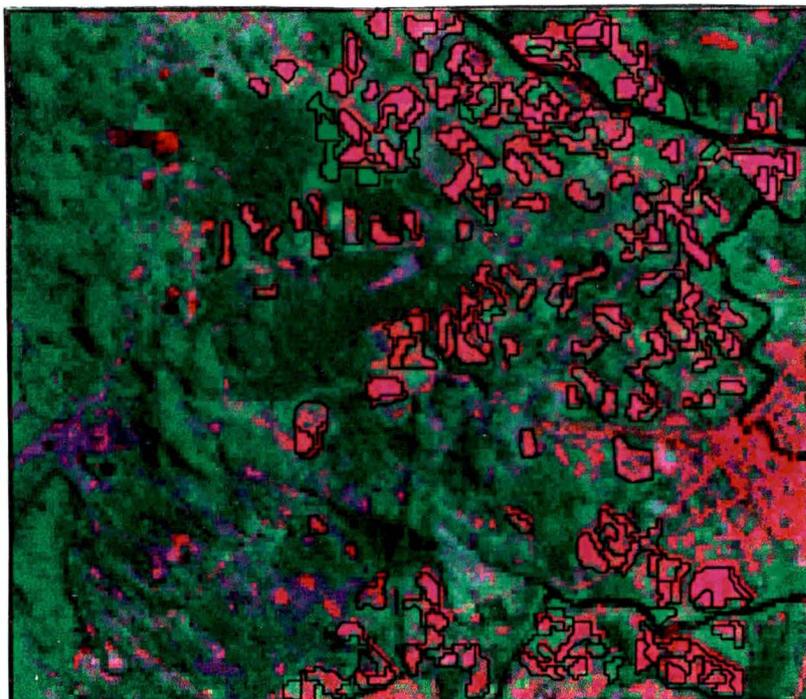


Figura 21- Exemplo de imagem segmentada com amostras da classe de agricultura. Na imagem, na composição 3, 4 e 5 a coloração desta classe é de verde bem claro ou rosa claro.



Figura 22- Observação do controle de campo da classe de uso e ocupação do solo de agricultura. (Foto do Autor- 2001).

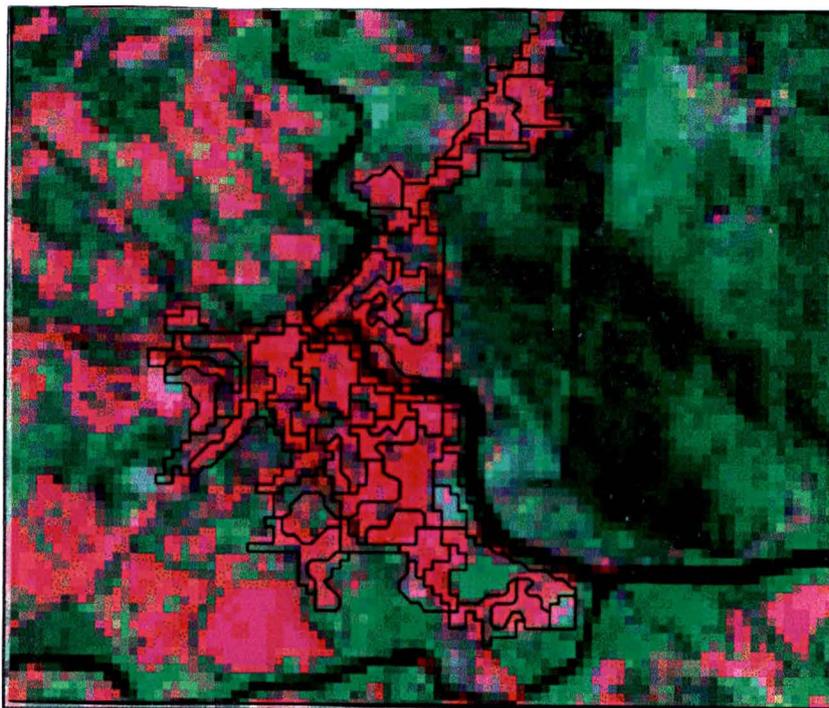


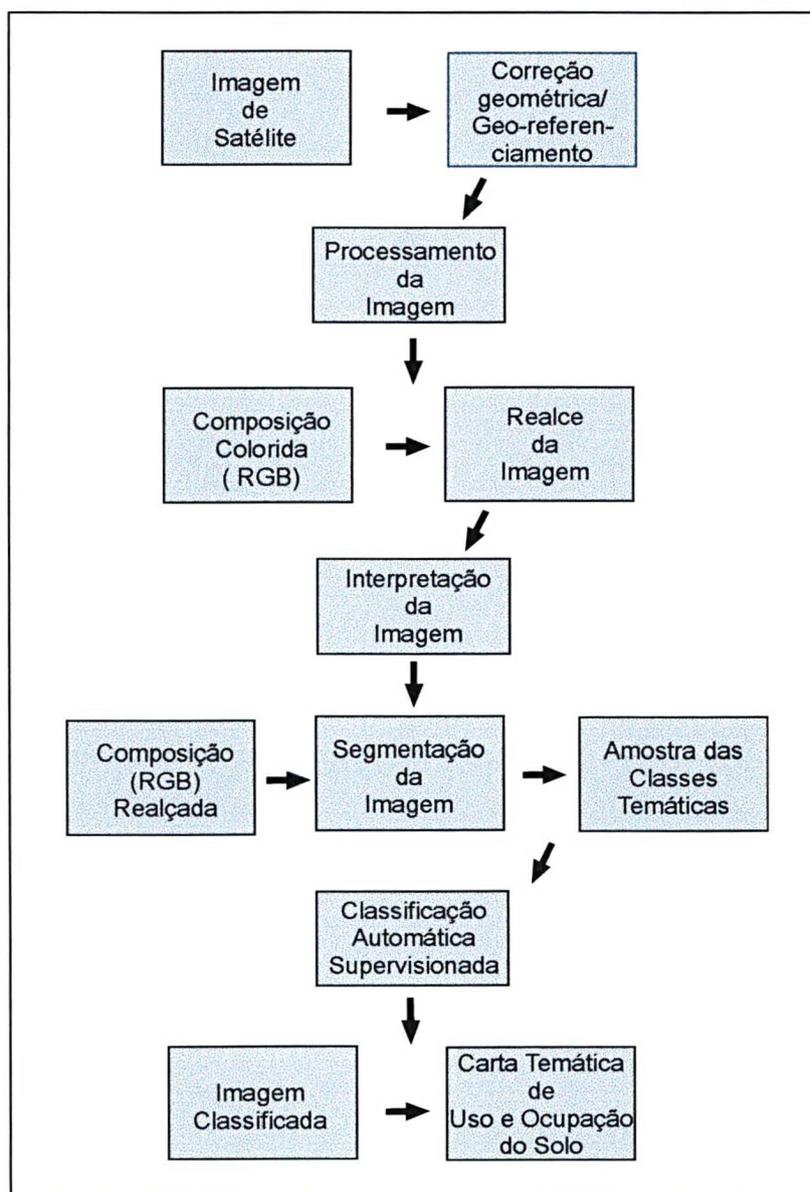
Figura 23- Exemplo de imagem segmentada com amostras da classe de área urbana. Na imagem, na composição 3, 4 e 5 a coloração desta classe é de rosa mais intenso .



Figura 24- Observação do controle de campo da classe de uso e ocupação do solo de área urbana. (Foto do Autor- 2001).

A figura 25 apresenta o fluxograma com todas as fases do processamento e interpretação de imagens de satélite utilizadas na confecção das cartas de uso em ocupação do solo para os anos de 1986 e 1999.

Figura 25- Fluxograma da Fase de Processamento e Interpretação das Imagens de Satélite para a Confecção das Cartas de Uso e Ocupação do solo (1986, 1999)



## 2. Uso e Ocupação do Solo

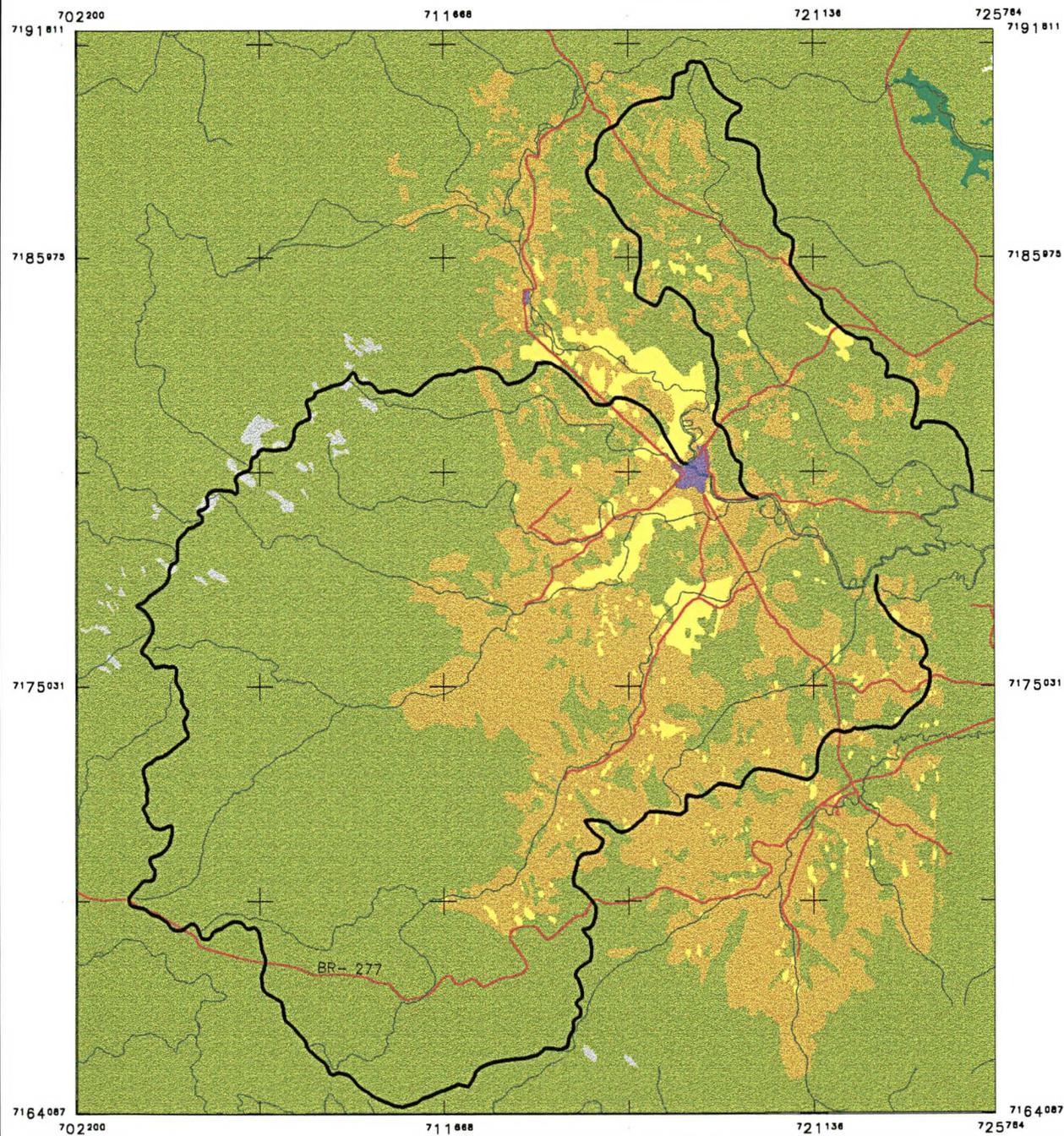
A partir da interpretação das imagens foram confeccionadas as cartas de uso e ocupação do solo dos anos de 1986 e 1999 (figuras 27 e 28). A carta de uso e ocupação do solo de 1953 (figura 26) foi gerada a partir da compilação dos dados da carta de uso do solo de 1953, desenvolvida por (MARCHIORO, 1999). As cartas de uso e ocupação do solo serão de grande utilidade para a separação das áreas de cobertura vegetal de porte arbóreo, que influenciam no fator de segurança das encostas, das áreas de vegetação de porte mais ralo, de pouca relevância na aplicação da equação de fatores de segurança das encostas.

### 2.1 Legenda das Cartas de Uso e Ocupação do Solo

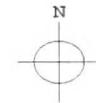
As classes identificadas para o mapeamento de uso e ocupação do solo basearam-se na legenda proposta por MARCHIORO (1999). As classes cobertas por estratos vegetais, foram divididas conforme o seu porte e estágio de regeneração, seguindo o critério proposto pelo IBGE (1992), ficando a legenda do mapa de uso e ocupação do solo assim representada:

- **Vegetação de Porte Arbóreo:** consiste em toda a vegetação da Formação Pioneira (Floresta Ombrófila Densa, com suas sub-divisões e Floresta Ombrófila Mista), Capoeiras, Capoeirões e Floresta Secundária. A Formação Pioneira apresenta na sua estrutura original mais de um estrato arbóreo. As vegetações de Capoeiras, Capoeirões e Floresta Secundária sofreram regeneração, após o corte raso, apresentando assim, diferentes estágios de vegetação, conforme a sua recuperação. Incluem-se na vegetação de Porte Arbóreo a terceira, quarta e quinta fase do critério proposto pelo IBGE (1992), que caracteriza a formação secundária.
- **Vegetação de Porte Herbáceo e Arbustivo:** são comunidades vegetais de porte ralo, que incluem os estágios de Vegetação Herbácea e Capoeirinha, regenerados após sofrerem corte raso. Considerou-se aqui a primeira e a segunda fase de regeneração das espécies proposta pelo IBGE (1992). Pertence também a essa classe de uso e ocupação as áreas cobertas por pastagens e cultivo de banana, que dependendo das presenças de espécies

Figura 26 - Mapa de Uso e Ocupação do Solo de 1953 da Área de Estudo



## Mapa de Uso e Ocupação do Solo de 1953



- Hidrografia
- Estradas
- Limite das Bacias Hidrográficas
- Corpo d' água
- Agricultura
- Vegetação de Porte Herbáceo e Arbustivo
- Rochoso
- Vegetação de Porte Arbóreo
- Mangue
- Área\_Urbana

1.6 0 1.6 3.3 4.9 6.6 km  
Escala 1/165000

Fonte: MARCHIORO, N. "Tese de Doutorado— A Sustentabilidade dos Sistemas Agrário do Litoral do Paraná: Ocaso de Morretes". vol II, 1999. Digitalizado e Organizado por: Fabrícia Gioppo Nunes sob orientação Prof. Dr Alberto Pio Fiori

Figura 27 - Mapa de Uso e Ocupação do Solo de 1986 da Área de Estudo

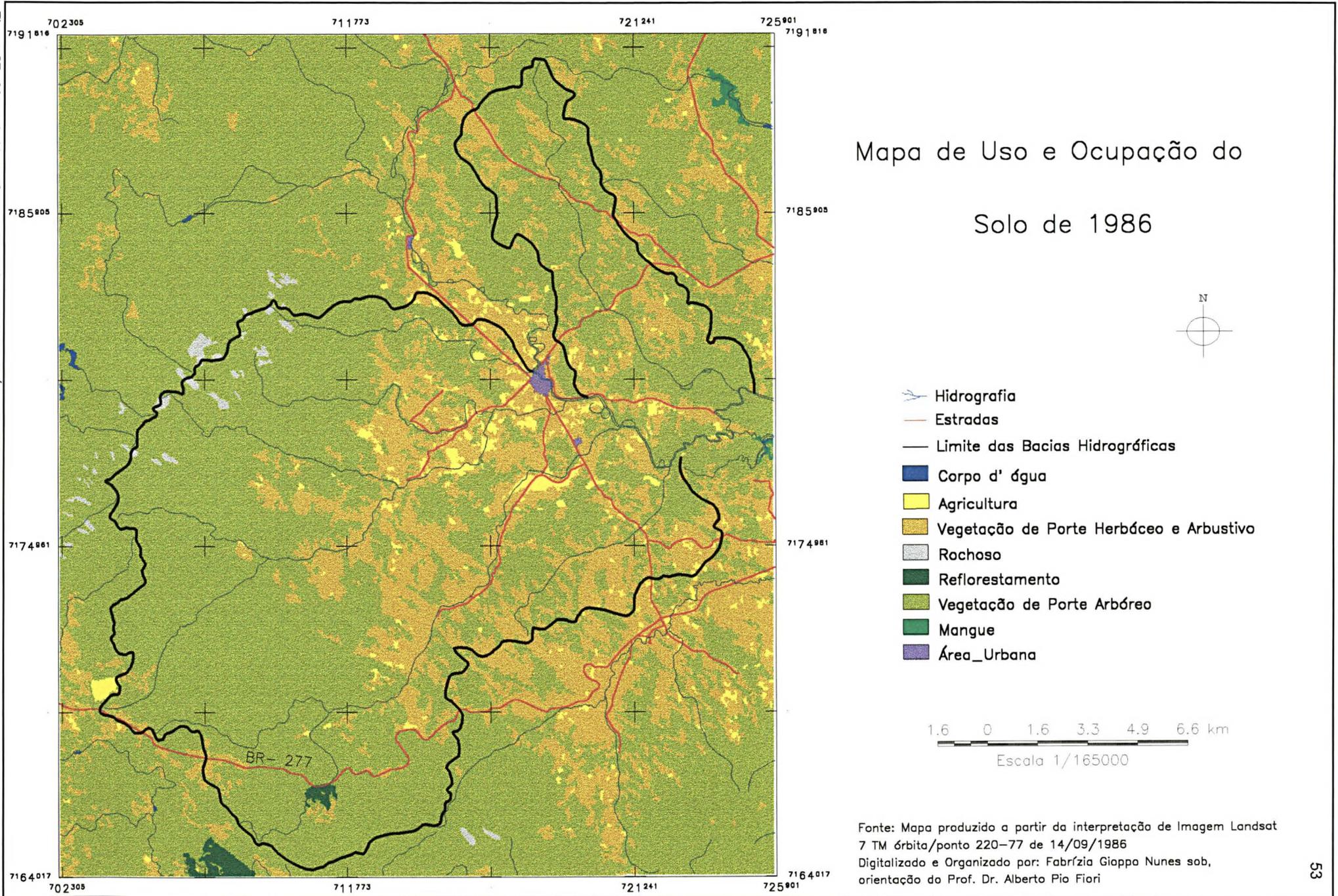
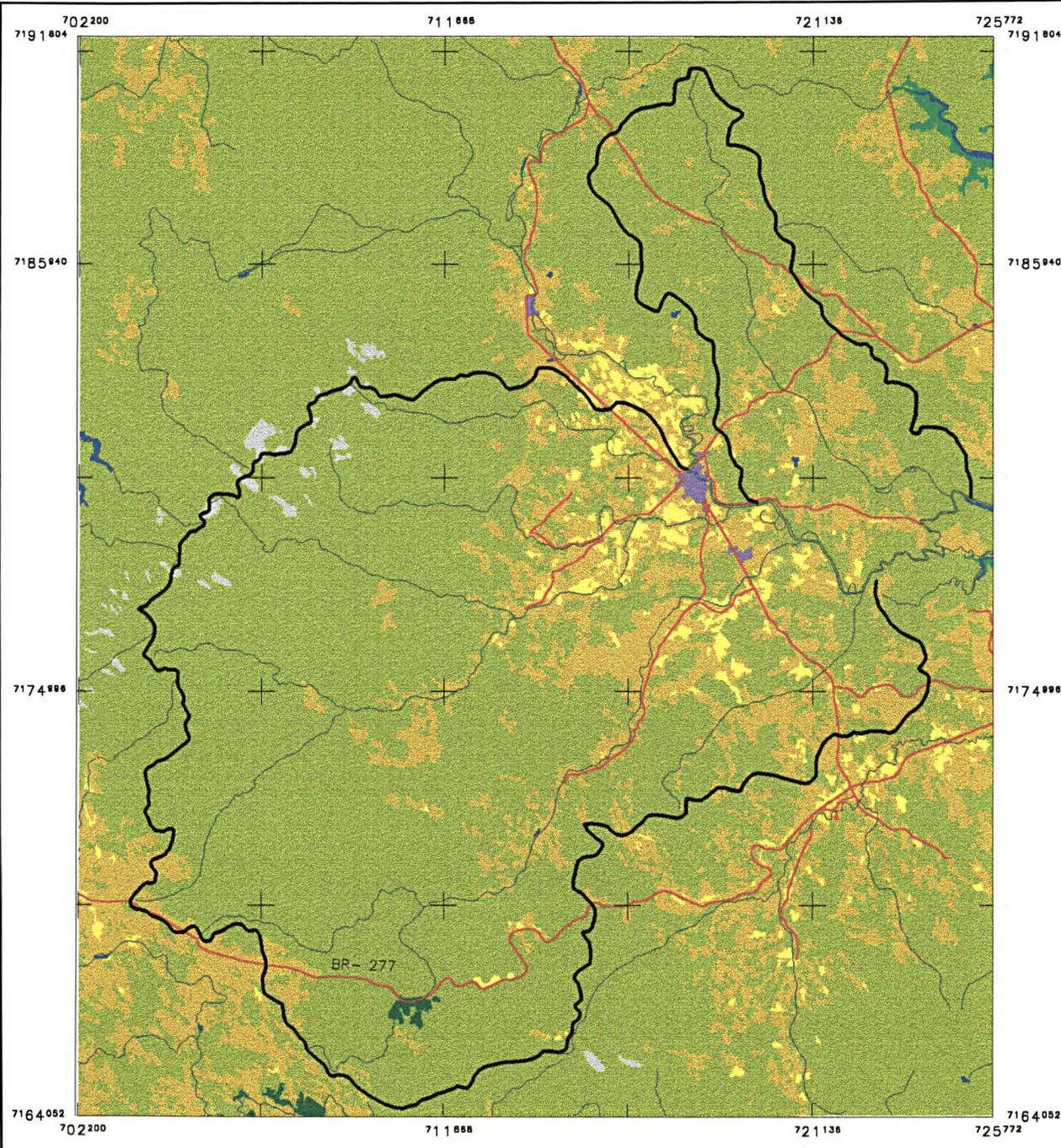
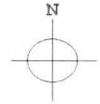


Figura 28 - Mapa de Uso e Ocupação do Solo de 1999 da Área de Estudo



## Mapa de Uso e Ocupação do Solo de 1999



- Hidrografia
- Estradas
- Limite das Bacias Hidrográficas
- Corpo d' água
- Agricultura
- Vegetação de Porte Herbáceo e Arbustivo
- Rochoso
- Reflorestamento
- Vegetação de Porte Arbóreo
- Mangue
- Área\_Urbana

1.6 0 1.6 3.3 4.9 6.6 km  
Escala 1/165000

Fonte: Mapa produzido a partir da interpretação de Imagem Landsat 7 TM, órbita - 220, ponto - 77 de 26/09/99  
Digitalizado e Elaborado por: Fabrícia Gioppo Nunes sob orientação do Prof. Dr. Alberto Pio Fiori

herbáceas e arbustivas, não puderam ser separadas das Capoeirinhas durante a interpretação das imagens de satélite.

- **Reflorestamento:** são as áreas cultivadas com espécies florestais nos diferentes estágios de crescimento.

- **Área Urbana:** área destinada a lotes residenciais, comerciais, industriais, mineração e vias de circulação, com baixa a alta densidade de ocupação.

-**Rochoso:** área de afloramento de rochas com vegetação rala.

- **Agricultura:** a essa classe correspondem as áreas de cultivo, com espécies perenes ou temporárias e as áreas de pastagens sem presença arbustivas.

Como principais cultivos na região, se destaca o da banana, gengibre, mandioca, maracujá, cana de açúcar e chuchu; e como indústrias, as de bala de banana e aguardente. Quanto ao comércio, este é voltado principalmente ao turismo local, com vendas de produtos artesanais, restaurantes e hotéis.

## 2.2 Análise Multitemporal do Uso e Ocupação do Solo

A quantificação dos diferentes padrões de uso e ocupação do solo ao longo do tempo tornou-se possível através da operação de análise espacial, realizada dentro do ambiente Spring. Para tal operação de quantificação foi executado o cálculo de área de cada polígono, que representam as classes de uso e ocupação do solo, nos mapas temáticos dos anos de 1953, 1986 e 1999 (figuras 26, 27 e 28).

Os dados estatísticos multitemporais do uso e ocupação do solo mostram que há um predomínio absoluto da vegetação de porte arbóreo, durante todos os períodos estudados. No ano de 1953 esse tipo de vegetação apresentava um total de 202,622km<sup>2</sup>, ou seja, 71,63% de toda a área em estudo, diminuindo em 1986 para 202,301 km<sup>2</sup>, passando a possuir 71,52% da área. Já no ano de 1999 observa-se uma considerável regeneração da vegetação arbórea,

ocupando 220,866 km<sup>2</sup> com um percentual de 78,79%. Essa classe de uso e ocupação do solo, dentro das bacias em estudo, encontra-se principalmente nas encostas da Serra do Mar, sobre as zonas de altas declividades.

Como a segunda maior área de uso e ocupação, apresenta-se a vegetação de porte herbáceo e arbustivos, com uma extensão de 70,348km<sup>2</sup> e um percentual de 24,87% de toda a área em 1953. No ano de 1986 essa classe aumenta para 71,805km<sup>2</sup> passando a ocupar 25,38%, e diminuindo significativamente para 51,171 km<sup>2</sup> passando a um total de 18,10% da área, em 1999.

A classe de reflorestamento surgiu somente a partir de 1986, somando uma pequena área de 0,512 km<sup>2</sup>, representando apenas 0,18% da área em estudo. Em 1999 essa área diminuiu para 0,505 km<sup>2</sup>, passando a ocupar 17% do total da área.

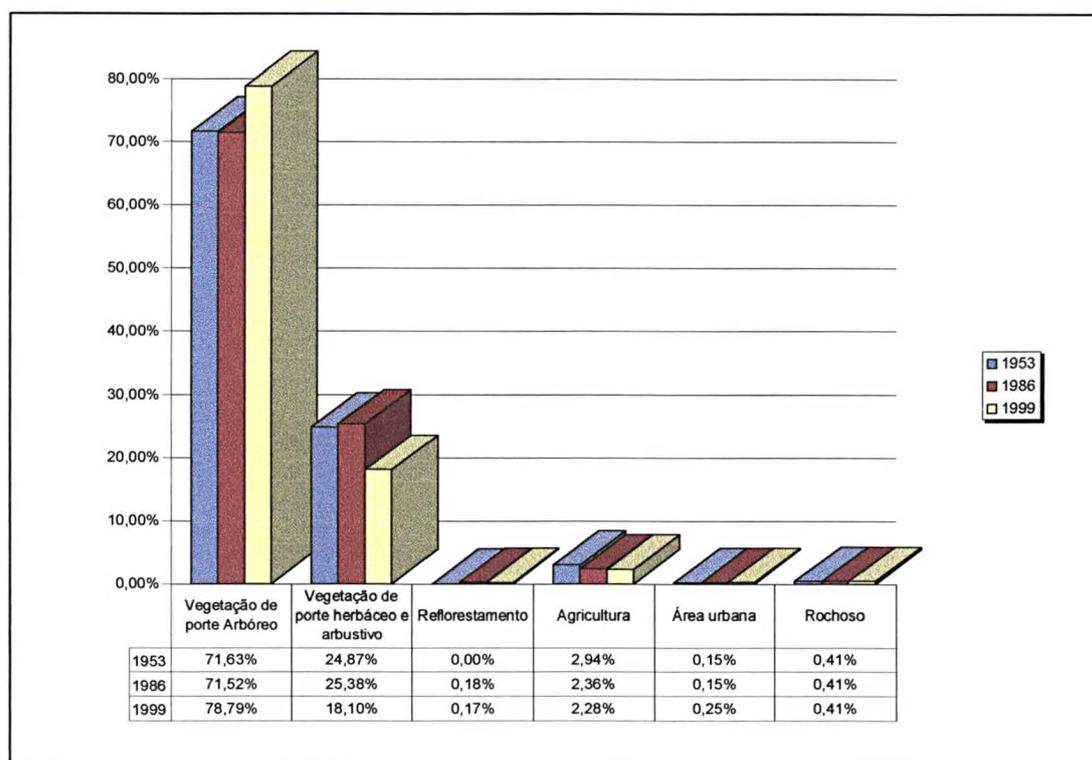
As regiões em exploração agrícola compreendiam cerca de 8,314 km<sup>2</sup>, ou seja, 2,94% do total da área em 1953. Nos anos de 1986 e 1999 observa-se uma diminuição sucessiva dessa classe, passando a possuir uma área de 6,664 km<sup>2</sup> com 0,18% em 1986 e 6,428 km<sup>2</sup> com 0,24% em 1999. De acordo com MARCHIORO (1999), deve-se considerar que a área efetiva de agricultura pode ter sido subestimada, pelo fato de parte da banana estar sendo cultivada, no seu estágio de implantação, em sub-bosque.

A área urbana nos anos de 1953 e 1986 era somente de 0,413km<sup>2</sup>, perfazendo assim, 0,15% de toda a área. Em 1999 o núcleo urbano sofre um pequeno aumento para 0,650 km<sup>2</sup> passando a ocupar 0,25% de todo o território.

A classe de rochoso abrange cerca de 1,147km<sup>2</sup> com 0,41% de toda a área das bacias, localizando-se predominantemente nas regiões de altitudes elevadas.

O gráfico da figura 29, ilustra as áreas em porcentagem de cada classe de uso e ocupação do solo, possibilitando uma visão geral da variação destas classes, no decorrer dos três anos examinados.

Figura 29 – Gráfico da Variação das Classes de Uso e Ocupação do solo da Área em Estudo (anos de 1953, 1986 e 1999)



Fonte: Dados obtidos através de cálculos de áreas em ambiente SIG, dos mapas temáticos de uso e ocupação do solo (1953, 1986, 1999)

A análise multitemporal dos diferentes padrões de uso e ocupação do solo possibilitou a observação nas mudanças da cobertura do solo. Durante os últimos 46 anos verificou-se uma significativa recuperação da vegetação de porte arbóreo, principalmente na região montanhosa. Essa recuperação fica evidenciada pela diminuição da área de vegetação de porte herbáceo e arbustivo, devido a sua regeneração, cedendo assim, lugar para a vegetação de porte arbóreo. As áreas agrícolas que vinham sendo cultivadas nas encostas da serra, de forma extensiva, foram abandonadas, com a imigração dessas atividades para a região das planícies, aluvial e de restinga.

## Capítulo IV

### 1. Método de Lopes para a Obtenção dos Valores da Coesão e Ângulo de Atrito Interno

As propriedades de coesão e de ângulo de atrito interno dos solos foram determinadas pelo método de retroanálise, elaborado por LOPES (1995). Este método utiliza-se do modelo desenvolvido por HOEK 1972 *apud* LOPES (1995), para escorregamento de solos em vertentes afetadas por rupturas circulares.

Durante a aplicação da metodologia, seguiu-se a descrição de LOPES (1995) e de FIORI & CARMIGNANI (2001), onde foi realizada inicialmente, a fotointerpretação de cicatrizes de escorregamento, para a posterior confecção de perfis topográficos, que determinaram os pares de altura/ângulo de taludes limites.

Após, desenharam-se todos os perfis topográficos que pertencessem a uma mesma unidade de solo em um único diagrama, tendo como ponto comum a sua base, para traçar a envoltória que representará a curva limite de estabilidade de encosta.

Diversas retas de valores do ângulo ( $i$ ) (  $21^\circ$ ,  $26^\circ$ ,  $34^\circ$   $40^\circ$  e  $45^\circ$ ), foram lançados sobre o diagrama da envoltória (como ilustram as figuras de 30 a 37), procurando sempre que possível, considerar os mesmos valores utilizados por LOPES (1995). Outros valores de ângulos ( $i$ ) tiveram que ser acrescentados na envoltória dos perfis das unidades de solo Ca1, Ca3 e Ca5 para que pudesse ocorrer a intercepção de altura/ângulo de taludes limites. A intercepção de cada reta de ângulo ( $i$ ) com a envoltória, definiu um par de dados de altura/ângulo de inclinação de taludes.

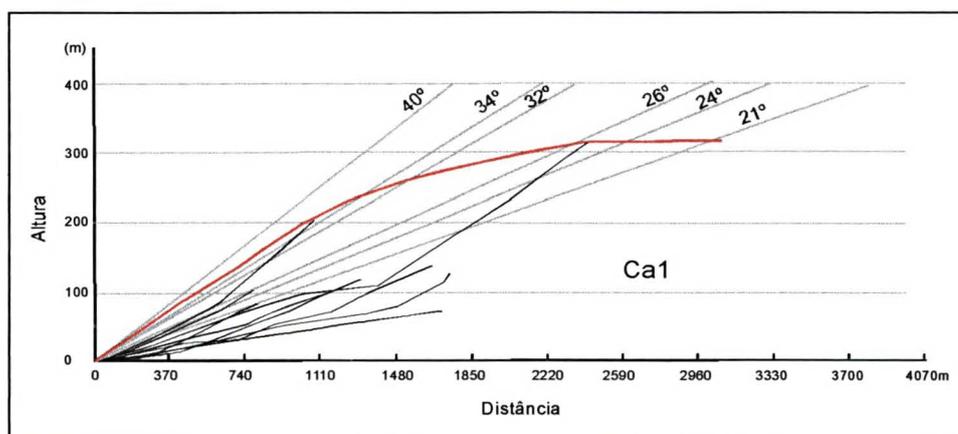


Figura 30 - Diagrama dos perfis topográficos, traçado da envoltória (em vermelho) e escolha dos pares de ângulo/ altura máxima estável (unidade de solo Ca1).

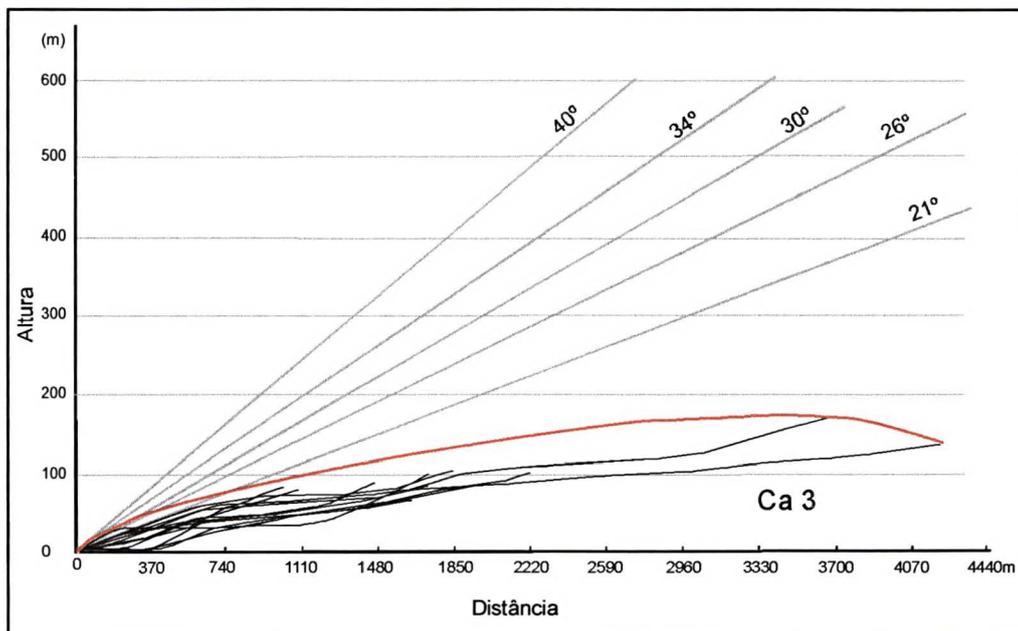


Figura 31 - Diagrama dos perfis topográficos, traçado da envoltória (em vermelho) e escolha dos pares de ângulo/ altura máxima estável (unidade de solo Ca3).

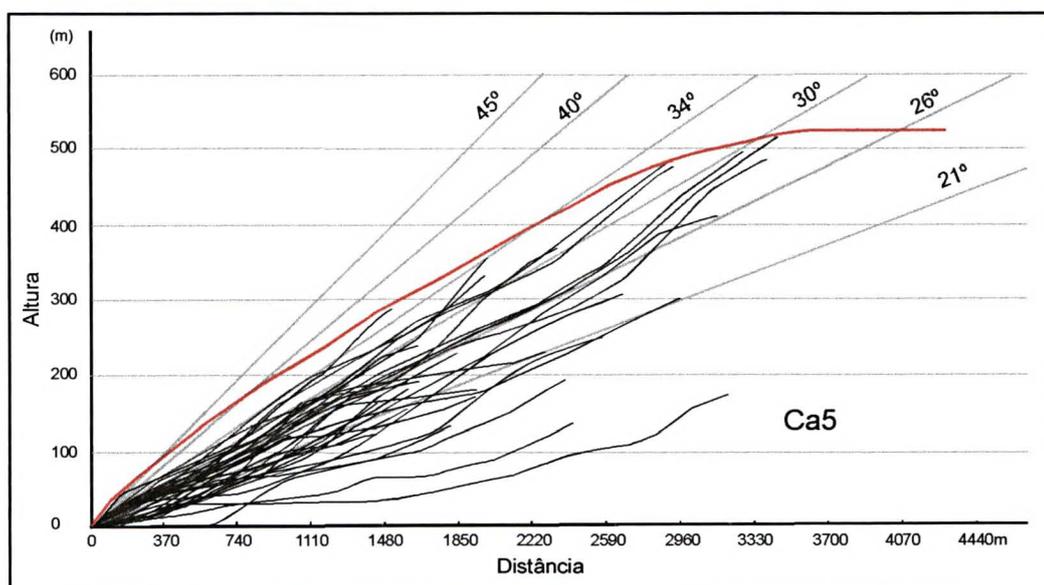


Figura 32 - Diagrama dos perfis topográficos, traçado da envoltória (em vermelho) e escolha dos pares de ângulo/ altura máxima estável (unidade de solo Ca5).

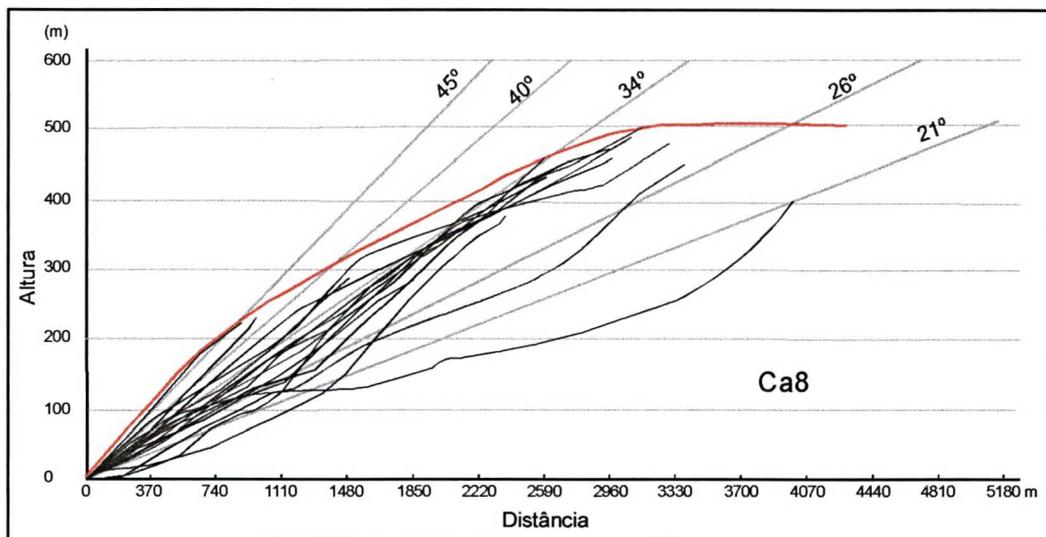


Figura 33 - Diagrama dos perfis topográficos, traçado da envoltória (em vermelho) e escolha dos pares de ângulo/ altura máxima estável (unidade de solo Ca8).

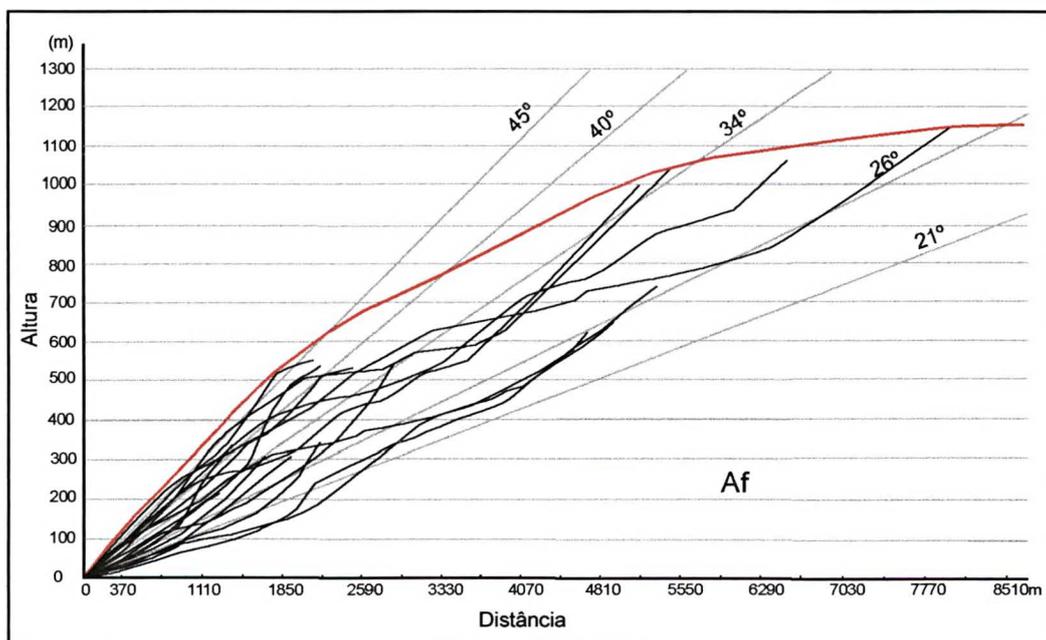


Figura 34 - Diagrama dos perfis topográficos, traçado da envoltória (em vermelho) e escolha dos pares de ângulo/ altura máxima estável (unidade de solo Af).

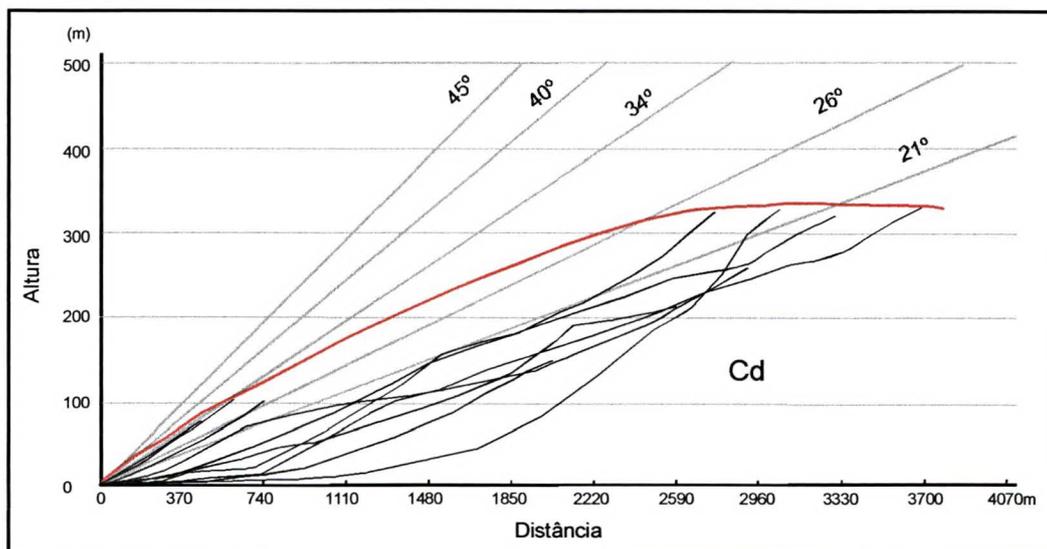


Figura 35 - Diagrama dos perfis topográficos, traçado da envoltória (em vermelho) e escolha dos pares de ângulo/ altura máxima estável (unidade de solo Cd).

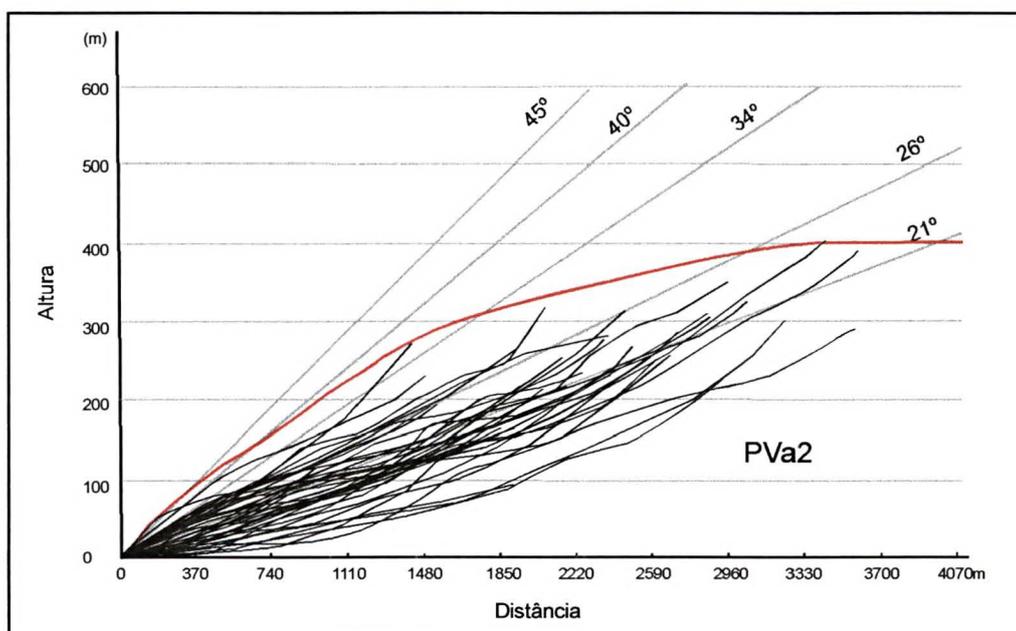


Figura 36 - Diagrama dos perfis topográficos, traçado da envoltória (em vermelho) e escolha dos pares de ângulo/ altura máxima estável (unidade de solo PVa2).

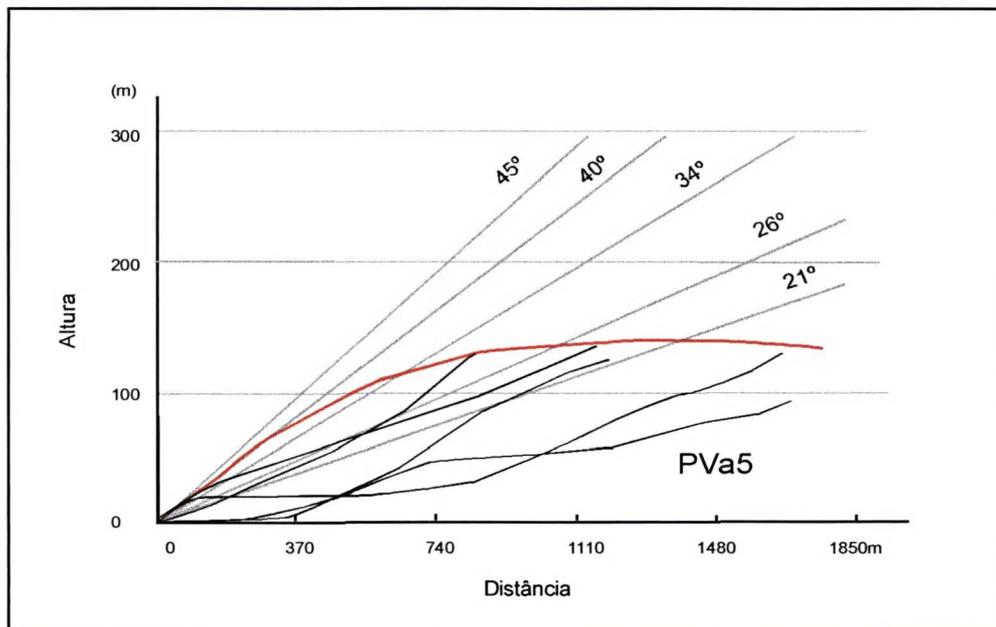


Figura 37 - Diagrama dos perfis topográficos, traçado da envoltória (em vermelho) e escolha dos pares de ângulo/ altura máxima estável (unidade de solo PVa5).

Esses pares de dados de altura/ângulo de inclinação, foram substituídos em equações matemática que serviram para determinar as funções 'X' e 'Y'.

A função 'X' escolhida, revela o ângulo de talude para o caso de existência de água com fluxo normal descendente e superfície de ruptura circular:

$$X = i - \phi \left( 1,2 - 0,3 \frac{H_w}{H} \right) \quad (\text{equação 01})$$

Onde :

$i$  = ângulo de inclinação do talude intercepto

$\phi$  = ângulo de atrito interno

$H_w/H = 0,5$  isto é, presença do nível de água à meia altura do corte do talude

A função 'Y', revela a altura do talude para o caso de existência de fendas de tração preenchida por água:

$$Y = \left[ 1 + \left( \frac{i-10}{100} \right) \frac{Z_o}{H} \right] \frac{\gamma H}{c} \quad (\text{equação 02})$$

Onde:

$i$  = ângulo de inclinação do talude intercepto

$c$  = coesão do solo

$\gamma$  = peso específico do solo

$H$  = altura do talude intercepto

$Z_o/H = 0,5$  isto é, presença de fendas de tração, com profundidade máxima até a metade da altura do talude

Substituindo os valores numéricos determinados acima (altura/ângulo limite dos taludes, ângulo de inclinação dos taludes, peso específico do solo, altura do nível da água e profundidade da fenda de tração), nas funções 'X' e 'Y' apresentadas, obtiveram-se novas funções constantes de 'X' e 'Y', para cada talude considerado, na sua respectiva unidade de solo, como segue nas tabelas de 03 a 10.

Tabela 03 - Dados obtidos a partir do diagrama da envoltória e respectivas funções X e Y (unidade de solo Ca1)

Talude	$i$ (°)	H (m)	Função X	Função Y
1	40°	20	$X = 40 - 1,05\phi$	$Y = 40,5/c$
2	34°	240	$X = 34 - 1,05\phi$	$Y = 473,1/c$
3	32°	265	$X = 32 - 1,05\phi$	$Y = 517,7/c$
4	26°	320	$X = 26 - 1,05\phi$	$Y = 608,2/c$
5	21°	320	$X = 21 - 1,05\phi$	$Y = 594,2/c$

Tabela 04 - Dados obtidos a partir do diagrama da envoltória e respectivas funções X e Y (unidade de solo Ca3)

Talude	$i$ (°)	H (m)	Função X	Função Y
1	40°	12	$X = 40 - 1,05\phi$	$Y = 24,3/c$
2	34°	20	$X = 34 - 1,05\phi$	$Y = 39,4/c$
3	30°	40	$X = 30 - 1,05\phi$	$Y = 77,4/c$
4	26°	47	$X = 26 - 1,05\phi$	$Y = 89,3/c$
5	21°	80	$X = 21 - 1,05\phi$	$Y = 148,5/c$

Tabela 05 - Dados obtidos a partir do diagrama da envoltória e respectivas funções X e Y (unidade de solo Ca5)

Talude	i (°)	H (m)	Função X	Função Y
1	45°	80	X= 45-1,05φ	Y= 165,4/c
2	40°	170	X= 40-1,05φ	Y= 344/c
3	34°	400	X= 34-1,05φ	Y= 788,4/c
4	30°	510	X= 30-1,05φ	Y= 987,3/c
5	26°	520	X= 26-1,05φ	Y= 988,4/c

Tabela 06- Dados obtidos a partir do diagrama da envoltória e respectivas funções X e Y (unidade de solo Ca8)

Talude	i (°)	H (m)	Função X	Função Y
1	45°	220	X= 45-1,05φ	Y=455/c
2	40°	310	X= 40-1,05φ	Y=627,4/c
3	34°	460	X= 34-1,05φ	Y=906,7/c
4	26°	500	X= 26-1,05φ	Y=950,4/c
5	21°	0	0	0

Tabela 07- Dados obtidos a partir do diagrama da envoltória e respectiva função X e Y (unidade de solo Af)

Talude	i (°)	H (m)	Função X	Função Y
1	45°	620	X= 45-1,05φ	Y=1129,2/c
2	40°	780	X= 40-1,05φ	Y=1390,3/c
3	34°	1040	X= 34-1,05φ	Y=1805,4/c
4	26°	1160	X= 26-1,05φ	Y=1941,8/c
5	21°	0	0	0

Tabela 08- Dados obtidos a partir do diagrama da envoltória e respectivas funções X e Y (unidade de solo Cd)

Talude	i (°)	H (m)	Função X	Função Y
1	45°	20	X= 45-1,05φ	Y=42,3/c
2	40°	40	X= 40-1,05φ	Y=82,8/c
3	34°	120	X= 34-1,05φ	Y=241,9/c
4	26°	320	X= 26-1,05φ	Y=622,1/c
5	21°	340	X= 21-1,05φ	Y=645,7/c

Tabela 09- Dados obtidos a partir do diagrama da envoltória e respectivas funções X e Y (unidade de solo PVa2)

Talude	i (°)	H (m)	Função X	Função Y
1	45°	80	X= 45-1,05φ	Y=169,2/c
2	40°	140	X= 40-1,05φ	Y=289,8/c
3	34°	310	X= 34-1,05φ	Y=624,9/c
4	26°	400	X= 26-1,05φ	Y=777,6/c
5	21°	400	X= 21-1,05φ	Y=759,6/c

Tabela 10- Dados obtidos a partir do diagrama da envoltória e respectivas funções X e Y (unidade de solo PVa5)

Talude	i (°)	H (m)	Função X	Função Y
1	45°	20	X= 45-1,05φ	Y=42,3/c
2	40°	65	X= 40-1,05φ	Y=134,5/c
3	34°	120	X= 34-1,05φ	Y=241,9/c
4	26°	140	X= 26-1,05φ	Y=272,2/c
5	21°	140	X= 21-1,05φ	Y=262,1/c

O próximo passo foi a atribuição dos valores a ' $\phi$ ' na função ' $X$ ', dentro do intervalo dessa variável, determinado por Hoek que é de  $10^\circ$  a  $40^\circ$ . Calculados os valores das funções ' $X$ ', sobrepuseram-se esses valores no ábaco de Hoek (anexo 02), sobre a curva  $F_s = 1$ . Após determinou-se, por meio de coordenadas cartesianas, os respectivos valores de  $Y$ , para a substituição deste na função ' $Y$ ', que permitiu a definição dos valores da coesão ( $c$ ). As tabelas 11 a 18 mostram os valores de ' $\phi$ ', ' $X$ ', ' $Y$ ' e ' $c$ ' obtidos para cada unidade de solo em seus taludes interceptos.

Tabela 11 – Determinação dos valores das funções  $X$  e  $Y$  e dos valores de ( $c$ ) em função de ( $\phi$ ) para cada um dos taludes estudados (unidade de solo Ca1)

$\phi$	Talude 1			Talude 2			Talude 3			Talude 4			Talude 5		
	X	Y	C	X	Y	c	X	Y	c	X	Y	c	X	Y	C
10	29,5	11	3,7	23,5	14,5	32,6	21,5	15	34,5	15,5	20,5	29,6	10,5	27	22,0
15	24,25	13,5	2,9	18,25	18	26,3	16,2	20	25,9	10,25	28	21,7	5,25	40	14,9
20	19	17	2,4	13	23,5	20,1	11	27	19,2	5	40,5	15,0	0	65,5	9,1
25	13,75	22	1,8	7,75	32,5	14,5	5,7	37	14	-0,25	65	9,3	-5,25	—	—
30	8,5	31,5	1,3	2,5	50	9,5	0,5	65	8	-5,5	—	—	-10,5	—	—
35	3,25	48,5	0,8	-2,25	97,5	4,8	-4,7	—	—	-10,75	—	—	-15,75	—	—
40	-2	97	0,4	-8	—	—	-10	—	—	-16	—	—	-21	—	—

Tabela 12 – Determinação dos valores das funções  $X$  e  $Y$  e dos valores de ( $c$ ) em função de ( $\phi$ ) para cada um dos taludes estudados (unidade de solo Ca3)

$\phi$	Talude 1			Talude 2			Talude 3			Talude 4			Talude 5		
	X	Y	c	X	Y	c	X	Y	c	X	Y	c	X	Y	c
10	29,5	11	2,2	23,5	14,5	2,7	19,5	17	4,6	15,5	20,5	4,4	10,5	27	5,5
15	24,25	13,5	1,8	18,25	18	2,2	14,2	22	3,5	10,25	28	3,2	5,25	40	3,7
20	19	17	1,4	13	23,5	1,7	9	30	2,6	5	40,5	2,2	0	65,5	2,2
25	13,75	22	1,1	7,75	32,5	1,2	3,7	45	1,7	-0,25	65	1,3	-5,25	—	—
30	8,5	31,5	0,7	2,5	50	0,8	-1,5	88	0,9	-5,5	—	—	-10,5	—	—
35	3,25	48,5	0,5	-2,25	97,5	0,4	-6,7	—	—	-10,75	—	—	-15,75	—	—
40	-2	97	0,2	-8	—	—	-12	—	—	-16	—	—	-21	—	—

Tabela 13 – Determinação dos valores das funções  $X$  e  $Y$  e dos valores de ( $c$ ) em função de ( $\phi$ ) para cada um dos taludes estudados (unidade de solo Ca5)

$\phi$	Talude 1			Talude 2			Talude 3			Talude 4			Talude 5		
	X	Y	c	X	Y	c	X	Y	c	X	Y	c	X	Y	c
10	34,5	10	16,5	29,5	11	31,3	23,5	14,5	54,4	19,5	17	58	15,5	20,5	48,2
15	29,25	11,5	14,4	24,25	13,5	25,5	18,25	18	43,8	14,2	22	44,8	10,25	28	35,3
20	24	14	11,8	19	17	20,2	13	23,5	33,5	9	30	33	5	40,5	24,4
25	18,75	17,5	9,4	13,75	22	15,6	7,75	32,5	24,2	3,7	45	22	-0,25	65	15,2
30	13,5	22,5	7,4	8,5	31,5	11	2,5	50	15,8	-1,5	88	11	-5,5	—	—
35	8,25	32	5	3,25	48,5	7	-2,25	97,5	8	-6,7	—	—	-10,75	—	—
40	3	49	3,4	-2	97	3,5	-8	—	—	-12	—	—	-16	—	—

Tabela 14 – Determinação dos valores das funções  $X$  e  $Y$  e dos valores de ( $c$ ) em função de ( $\phi$ ) para cada um dos taludes estudados (unidade de solo Ca8)

$\phi$	Talude 1			Talude 2			Talude 3			Talude 4			Talude 5		
	X	Y	c	X	Y	c	X	Y	c	X	Y	c	X	Y	c
10	34,5	10	45	29,5	11	57	23,5	14,5	62,5	15,5	20,5	46,3	0	—	—
15	29,25	11,5	39,5	24,25	13,5	46,5	18,25	18	50,3	10,25	28	34	0	—	—
20	24	14	32,5	19	17	37	13	23,5	38,6	5	40,5	23,4	0	—	—
25	18,75	17,5	26	13,75	22	28,5	7,75	32,5	28	-0,25	65	14,6	0	—	—
30	13,5	22,5	20,2	8,5	31,5	20	2,5	50	18	-5,5	—	—	0	—	—
35	8,25	32	14,2	3,25	48,5	13	-2,25	97,5	9,3	-10,75	—	—	0	—	—
40	3	49	9,3	-2	97	6,5	-8	—	—	-16	—	—	0	—	—

Tabela 15 – Determinação dos valores das funções X e Y e dos valores de (c) em função de ( $\phi$ ) para cada um dos taludes estudados (unidade de solo Af)

$\phi$	Talude 1			Talude 2			Talude 3			Talude 4			Talude 5		
	X	Y	c	X	Y	c	X	Y	c	X	Y	c	X	Y	c
10	34,5	10	112,9	29,5	11	126,4	23,5	14,5	124,5	15,5	20,5	94,7	0	—	—
15	29,25	11,5	98,2	24,25	13,5	103	18,25	18	100,3	10,25	28	69,5	0	—	—
20	24	14	80,6	19	17	81,8	13	23,5	76,8	5	40,5	47,9	0	—	—
25	18,75	17,5	64,5	13,75	22	63,2	7,75	32,5	55,5	-0,25	65	29,8	0	—	—
30	13,5	22,5	50,2	8,5	31,5	44,1	2,5	50	36,1	-5,5	—	—	0	—	—
35	8,25	32	35,3	3,25	48,5	28,7	-2,25	97,5	18,5	-10,75	—	—	0	—	—
40	3	49	23	-2	97	14,3	-8	—	—	-16	—	—	0	—	—

Tabela 16 – Determinação dos valores das funções X e Y e dos valores de (c) em função de ( $\phi$ ) para cada um dos taludes estudados (unidade de solo Cd)

$\phi$	Talude 1			Talude 2			Talude 3			Talude 4			Talude 5		
	X	Y	c	X	Y	c	X	Y	c	X	Y	c	X	Y	c
10	34,5	10	4,2	29,5	11	7,5	23,5	14,5	16,7	15,5	20,5	30,3	10,5	27	23,9
15	29,25	11,5	3,7	24,25	13,5	6,1	18,25	18	13,4	10,25	28	22,2	5,25	40	16,2
20	24	14	3,0	19	17	4,9	13	23,5	10,3	5	40,5	15,3	0	65,5	9,8
25	18,75	17,5	2,4	13,75	22	3,8	7,75	32,5	7,4	-0,25	65	9,6	-5,25	—	—
30	13,5	22,5	1,9	8,5	31,5	2,6	2,5	50	4,8	-5,5	—	—	-10,5	—	—
35	8,25	32	1,3	3,25	48,5	1,7	-2,25	97,5	2,5	-10,75	—	—	-15,75	—	—
40	3	49	0,8	-2	97	0,85	-8	—	—	-16	—	—	-21	—	—

Tabela 17 – Determinação dos valores das funções X e Y e dos valores de (c) em função de ( $\phi$ ) para cada um dos taludes estudados (unidade de solo PVA2)

$\phi$	Talude 1			Talude 2			Talude 3			Talude 4			Talude 5		
	X	Y	c	X	Y	c	X	Y	c	X	Y	C	X	Y	c
10	34,5	10	16,9	29,5	11	26,3	23,5	14,5	43,1	15,5	20,5	37,9	10,5	27	28,2
15	29,25	11,5	14,7	24,25	13,5	21,5	18,25	18	34,7	10,25	28	27,8	5,25	40	19,0
20	24	14	12,1	19	17	17,1	13	23,5	26,6	5	40,5	19,2	0	65,5	11,6
25	18,75	17,5	9,6	13,75	22	13,2	7,75	32,5	19,3	-0,25	65	11,9	-5,25	—	—
30	13,5	22,5	7,5	8,5	31,5	9,2	2,5	50	12,5	-5,5	—	—	-10,5	—	—
35	8,25	32	5,3	3,25	48,5	5,9	-2,25	97,5	6,4	-10,75	—	—	-15,75	—	—
40	3	49	3,5	-2	97	2,9	-8	—	—	-16	—	—	-21	—	—

Tabela 18 – Determinação dos valores das funções X e Y e dos valores de (c) em função de ( $\phi$ ) para cada um dos taludes estudados (unidade de solo PVA5)

$\phi$	Talude 1			Talude 2			Talude 3			Talude 4			Talude 5		
	X	Y	c	X	Y	c	X	Y	c	X	Y	c	X	Y	c
10	34,5	10	4,2	29,5	11	12,2	23,5	14,5	16,7	15,5	20,5	13,3	10,5	27	9,7
15	29,25	11,5	3,7	24,25	13,5	9,9	18,25	18	13,4	10,25	28	9,7	5,25	40	6,5
20	24	14	3,0	19	17	7,9	13	23,5	10,3	5	40,5	6,7	0	65,5	4
25	18,75	17,5	2,4	13,75	22	6,1	7,75	32,5	7,4	-0,25	65	4,2	-5,25	—	—
30	13,5	22,5	1,9	8,5	31,5	4,3	2,5	50	4,8	-5,5	—	—	-10,5	—	—
35	8,25	32	1,3	3,25	48,5	2,8	-2,25	97,5	2,5	-10,75	—	—	-15,75	—	—
40	3	49	0,8	-2	97	1,4	-8	—	—	-16	—	—	-21	—	—

A partir dos diversos pares de valores de  $c/\phi$  determinados nas tabelas acima, foram construídos diagramas possíveis de atenderem às condições impostas por cada talude limite, para verificar os pontos de interseção entre eles. Esses pontos de interseção revelam pares de  $c/\phi$  que atendem as condições de dois ou mais talude, ilustrados nos diagramas das figuras de 38 a 45.

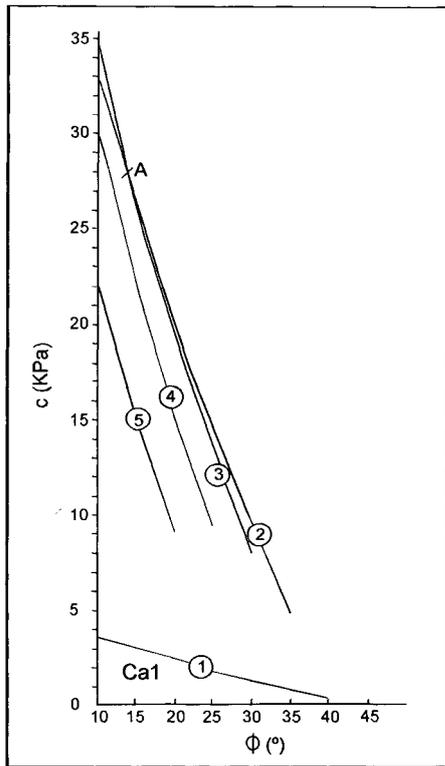


Figura 38 – Diagrama de (c) contra  $\phi$  dos taludes selecionados (unidade de solo Ca1).

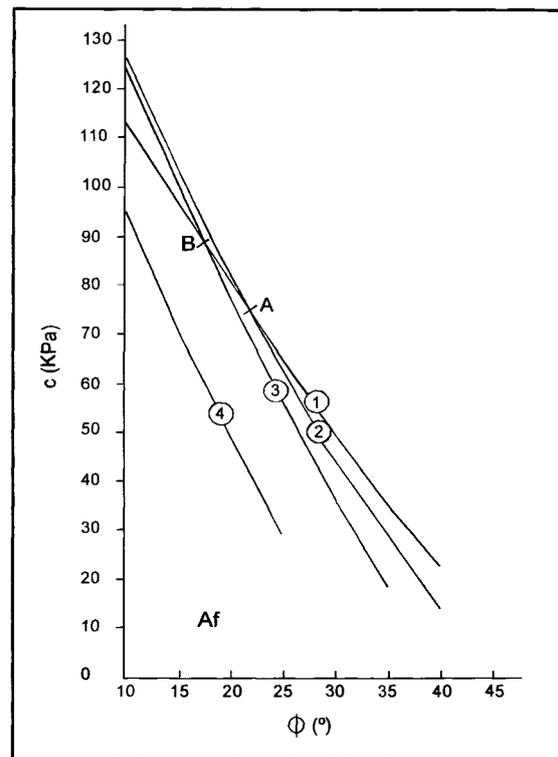


Figura 39 – Diagrama de (c) contra  $\phi$  dos taludes selecionados (unidade de solo Af).

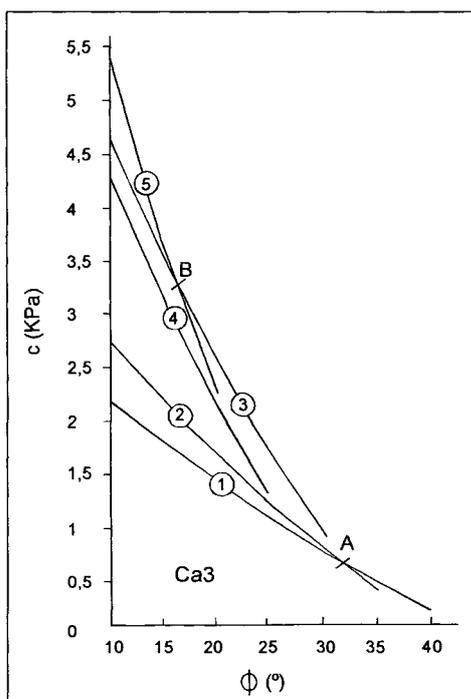


Figura 40 – Diagrama de (c) contra  $\phi$  dos taludes selecionados (unidade de solo Ca3).

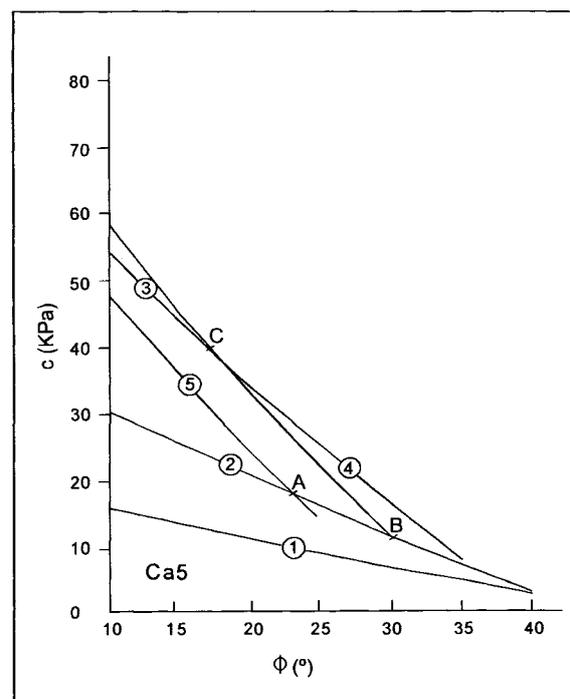


Figura 41 – Diagrama de (c) contra  $\phi$  dos taludes selecionados (unidade de solo Ca5).

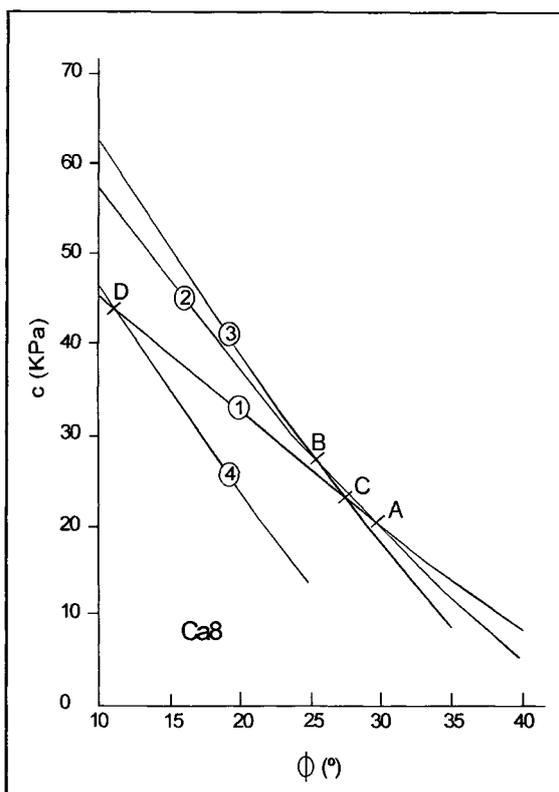


Figura 42 – Diagrama de (c) contra  $\phi$  dos taludes selecionados (unidade de solo Ca8).

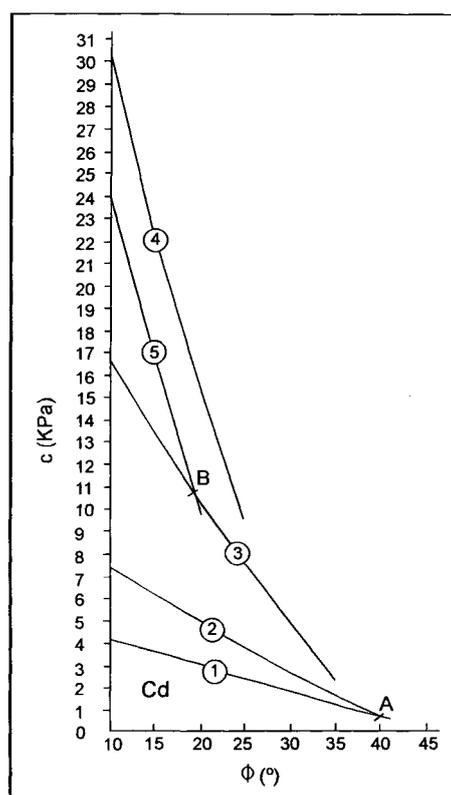


Figura 43 – Diagrama de (c) contra  $\phi$  dos taludes selecionados (unidade de solo Cd).

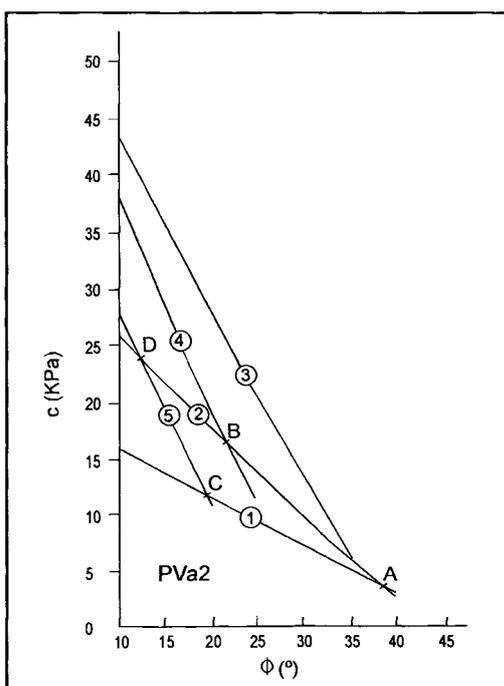


Figura 44 – Diagrama de (c) contra  $\phi$  dos taludes selecionados (unidade de solo PVa2).

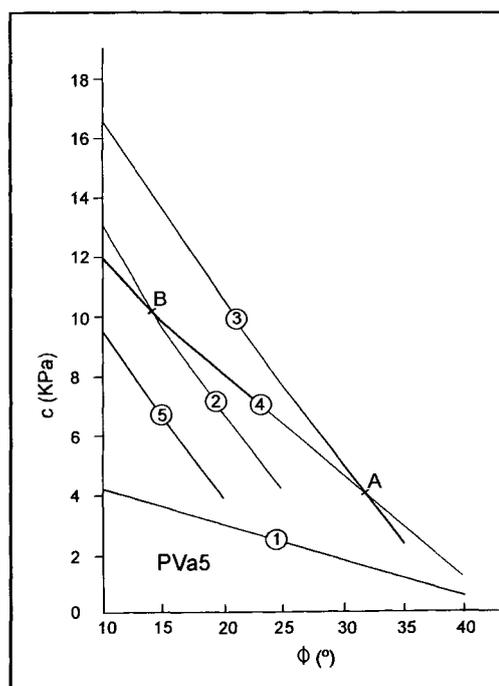


Figura 45 – Diagrama de (c) contra  $\phi$  dos talude selecionados (unidade de solo PVa5).

Por ajustes sucessivos, obedecendo ao critério de que a influência maior da coesão ocorre sobre os taludes mais baixos e íngremes, enquanto que a do atrito, sobre os mais altos e suaves (LOPES, 1995), foi possível chegar ao par que melhor atende às condições impostas por todos os taludes, que será aquela para a qual todos eles se aproximarão do  $F_s = 1$ .

Por fim, substituindo nas funções 'X' e 'Y', cada valor de  $c/\phi$  verificados nos diagramas de cada unidade de solo, obtiveram-se pares de X e Y para cada talude intercepto. As tabelas 19 a 25 apresentam os valores obtidos.

Tabela 19 - Cálculo das funções X e Y com a substituição dos valores de (c) e ( $\phi$ ) determinados, para cada intercepto de taludes (unidade de solo Ca3)

Talude/ Intercepto	(A) Função X	(A) Função Y	(B) Função X	(B) Função Y
1	9,6	30,3	22,2	7,6
2	3,6	49,2	16,2	12,3
3	-0,4	97,1	12,2	24,2
4	-4,4	111,6	8,2	27,9
5	-9,4	185,6	3,2	46,4

Tabela 20 - Cálculo das funções X e Y com a substituição dos valores de (c) e ( $\phi$ ) determinados, para cada intercepto de taludes (unidade de solo Ca5)

Talude/ Intercepto	(A) Função X	(A) Função Y	(B) Função X	(B) Função Y	(C) Função X	(C) Função Y
1	20,5	9,2	13,5	15	24	4,8
2	15,5	19	8,5	31,3	19	10
3	9,5	43,8	2,5	71,7	13	23,2
4	5,5	54,8	- 1,5	89,7	9	29
5	1,5	55	-5,5	89,8	5	29,1

Tabela 21 - Cálculo das funções X e Y com a substituição dos valores de (c) e ( $\phi$ ) determinados, para cada intercepto de taludes (unidade de solo Ca8)

Talude/ Intercepto	(A) Função X	(A) Função Y	(B) Função X	(B) Função Y	(C) Função X	(C) Função Y	(D) Função X	(D) Função Y
1	13,5	22,7	20,8	14,2	16,6	19	33,4	11,6
2	8,5	31,3	15,8	19,6	11,6	26	28,4	16
3	2,5	45,3	9,8	28,3	5,6	37,8	22,4	23,2
4	-5,5	47,5	1,8	29,7	-2,4	39,6	14,4	24,4

Tabela 22 - Cálculo das funções X e Y com a substituição dos valores de (c) e ( $\phi$ ) determinados, para cada intercepto de taludes (unidade de solo Af)

Talude/ Intercepto	(A) Função X	(A) Função Y	(B) Função X	(B) Função Y
1	20,8	15,8	26,1	12,8
2	15,8	19,4	21,1	15,8
3	9,8	25,2	15,1	20,5
4	1,8	27,1	7,1	22

Tabela 23 - Cálculo das funções X e Y com a substituição dos valores de (c) e ( $\phi$ ) determinados, para cada intercepto de taludes (unidade de solo Cd)

Talude/ Intercepto	(A) Função X	(A) Função Y	(B) Função X	(B) Função Y
1	3	47	25,05	4
2	-2	92	20,05	7,8
3	-8	26,9	14,05	23,04
4	-16	691	6,05	59,2
5	-21	717,4	1,05	61,4

Tabela 24 - Cálculo das funções X e Y com a substituição dos valores de (c) e ( $\phi$ ) determinados, para cada intercepto de taludes (unidade de solo PVa2)

Talude/ Intercepto	(A) Função X	(A) Função Y	(B) Função X	(B) Função Y	(C) Função X	(C) Função Y	(D) Função X	(D) Função Y
1	5,1	42,3	20,8	11,6	25	14	31,3	7,2
2	0,1	72,4	15,8	20	20	24	26,3	12,3
3	-5,9	156	9,8	43	14	52	20,3	26,5
4	-13,9	194	1,8	53,6	6	64,8	12,3	33
5	-18,9	190	-3,15	52,3	1	63,3	7,3	32,3

Tabela 25 - Cálculo das funções X e Y com a substituição dos valores de (c) e ( $\phi$ ) determinados, para cada intercepto de taludes (unidade de solo PVa5)

Talude/ Intercepto	(A) Função X	(A) Função Y	(B) Função X	(B) Função Y
1	10,3	11,75	30,3	4
2	5,3	37,3	25,3	12,9
3	-0,6	67	19,3	23,2
4	-8,6	75,6	11,3	26,2
5	-13,6	72,8	6,3	25,2

Os pares de 'X' e 'Y' para cada talude intercepto foram lançados no ábaco de ruptura circular de HOECK (1970), anexo 02, definindo na intercessão do eixo x com o eixo y, o valor da curva de fator de segurança mais próximo (ilustrados nas tabelas de 26 a 32). Por último, considerou-se como valores de c e  $\phi$ , para efeitos de cálculos de Fs, aquele em que a média dos valores das curvas de fator de segurança, dos taludes considerados, se aproximou mais do valor unitário.

A média dos valores das curvas de fator de segurança que se aproximou mais do valor unitário, para cada unidade de solo foram: Ca3 = 1,14, Ca5 = 1,04, Ca8 = 1,06, Af = 1,05, Cd = 1,22, PVa2 = 1,03 e PVa5 = 1,25, sendo os valores de c e  $\phi$  para os respectivos solos de: c = 3,2 KPa /  $\phi$  = 17°, c = 11 KPa /  $\phi$  = 30°, c = 24 KPa /  $\phi$  = 27°, c = 88 KPa /  $\phi$  = 18°, c = 10,5 KPa /  $\phi$  = 19°, c = 14,5 KPa /  $\phi$  = 23° e c = 10 KPa /  $\phi$  = 14°, como ilustrados nas tabelas de 26 a 32.

Tabela 26 - Média dos Fatores de Segurança determinados para cada talude (unidade de solo Ca3)

Talude/ Intercepto	(A) $c=0,8$ KPa; $\phi=29^\circ$	(B) $c=3,2$ KPa; $\phi=17^\circ$
1	0,99	1,4
2	0,99	1,25
3	0,98	1
4	—	1,05
5	—	1
Média	—	1,14

Tabela 27 - Média dos Fatores de Segurança determinados para cada talude (unidade de solo Ca5)

Talude/ Intercepto	(A) $c=18$ KPa; $\phi=23^\circ$	(B) $c=11$ KPa; $\phi=30^\circ$	(C) $c=34$ KPa; $\phi=20^\circ$
1	1,35	1,2	1,6
2	1,02	1	1,3
3	0,92	0,92	1
4	0,95	1	1
5	1	1,1	1,5
Média	1,05	1,04	1,28

Tabela 28 - Média dos Fatores de Segurança determinados para cada talude (unidade de solo Ca8)

Talude/ Intercepto	(A) $c=20$ KPa; $\phi=30^\circ$	(B) $c=32$ KPa; $\phi=23^\circ$	(C) $c=24$ KPa; $\phi=27^\circ$	(D) $c=44$ KPa; $\phi=11^\circ$
1	1	1,08	1	0,95
2	1	1	1	0,88
3	1,05	1	1	0,85
4	1,25	1,2	1,25	0,95
Média	1,07	1,07	1,06	0,90

Tabela 29 - Média dos Fatores de Segurança determinados para cada talude (unidade de solo Af)

Talude/ Intercepto	(A) $c=71,5$ KPa; $\phi=23^\circ$	(B) $c=88$ KPa; $\phi=18^\circ$
1	1	1
2	1	1
3	1,05	1
4	1,25	1,2
Média	1,07	1,05

Tabela 30 - Média dos Fatores de Segurança determinados para cada talude (unidade de solo Cd)

Talude/ Intercepto	(A) $c=0,9$ KPa; $\phi=40^\circ$	(B) $c=10,5$ KPa; $\phi=19^\circ$
1	1	1,8
2	1	1,4
3	1,23	0,98
4	—	0,98
5	—	0,98
Média	—	1,22

Tabela 31 - Média dos Fatores de Segurança determinados para cada talude (unidade de solo PVa2)

Talude/ Intercepto	(A) $c=4$ KPa; $\phi=38^\circ$	(B) $c=14,5$ KPa; $\phi=23^\circ$	(C) $c=12$ KPa; $\phi=19^\circ$	(D) $c=23,5$ KPa; $\phi=13^\circ$
1	1	1,18	1	1,1
2	1	1	0,88	1
3	—	0,9	0,75	0,8
4	—	1	0,9	0,9
5	—	1,1	1	1
Média	—	1,03	0,906	0,96

Tabela 32 - Média dos Fatores de Segurança determinados para cada talude (unidade de solo PVa5)

Talude/ Intercepto	(A) $c=3,6$ KPa; $\phi=33^\circ$	(B) $c=10$ KPa; $\phi=14^\circ$
1	1,4	1,6
2	1	1
3	1	1,5
4	1,3	1
5	1,6	1,15
Média	1,26	1,25

Dos valores obtidos pelo método de LOPES (1995), constituiu-se a tabela de dados a seguir, que será utilizada na aplicação da equação de fatores de segurança das encostas (Capítulo V).

**Tabela 33 - Valores Estimados das Propriedades Físicas e Mecânicas de cada Unidade de Solos**

Solo	Rocha de origem	Coesão	Ângulo de atrito interno	Peso específico natural do solo ( $\gamma_{nat}$ )	Espessura
Ca1	Migmatito	28 KPa	14°	17,6 KN/m <sup>3</sup>	100 cm
Ca3	Migmatito	3,2 KPa	17°	17,6 KN/m <sup>3</sup>	100 cm
Ca5	Migmatito	11 KPa	30°	17,6 KN/m <sup>3</sup>	150 cm
Ca8	Migmatito	24 KPa	27°	17,6 KN/m <sup>3</sup>	100 cm
Cd	Aluviões Recente/ Sedimentos Areno, Silticos, Argiloso de baía	10,5 KPa	19°	18 KN/m <sup>3</sup>	200 cm
PVa2	Decomposição de Migmatito/ Granito e Aluviões Recente	14,5 KPa	23°	18 KN/m <sup>3</sup>	200 cm
PVa5	Aluviões Recentes/ Decomposição de Migmatito/ Granito	10 KPa	14°	18 KN/m <sup>3</sup>	200 cm
HG1	Aluviões Recente/ Coluviões	---	---	---	200 cm
Af	Granito e Migmatito	88 KPa	18°	15,5 KN/m <sup>3</sup>	50 cm

\* Os pesos específicos de cada unidade de solo considerados para aplicação das equações, foram obtidos a partir da análise de laboratório, realizada por PINTO et al. (1993). A análise leva em consideração o tipo do material que origina os diferentes tipos de solos (rocha mãe). Já a profundidade dos perfis de cada unidade de solo, foi estimada no levantamento e reconhecimento dos solos do Estado do Paraná (EMBRAPA, 1984).

## Capítulo V

### 1 Instabilidade de Taludes

#### 1.1 Escorregamento e Evolução Natural das Encostas na Serra do Mar

Dentre os vários processos de movimentos de massa destacam-se os escorregamentos nas encostas, devido à sua grande importância de risco geológico às atividades humanas, causando desastres com perdas de vidas humanas e prejuízos econômicos. Trataremos aqui, em especial, deste tipo de movimentos de massa, por ser o escolhido para objeto de estudo do trabalho em questão.

Conforme FERNANDES & AMARAL (1996), os escorregamentos se caracterizam como movimentos rápidos, de curta duração, com planos de rupturas bem definidos, permitindo a distinção entre o material deslizado e aquele não movimentado.

CUNHA et al. (1991), consideram os escorregamentos como processos marcantes na evolução das encostas, caracterizando-se por movimentos rápidos, limites laterais e profundidade bem definida (superfície de ruptura). Os escorregamentos podem movimentar solos, solos e rochas ou apenas rochas. A geometria destes movimentos pode ser circular, planar ou em cunha, em função da existência ou não de estruturas ou planos de fraqueza nos materiais movimentados, que condicionam a formação das superfícies de ruptura.

Segundo CUNHA et al. op. cit, os escorregamentos podem ocorrer isoladamente no tempo e no espaço (escorregamentos esparsos), ou simultaneamente (escorregamentos generalizados), afetando áreas consideráveis das encostas.

De acordo com AUGUSTO FILHO (1995), os processos de escorregamento envolvem uma série contínua de eventos de causas e efeitos que resultam na ruptura de materiais terrestres (solo e/ou rocha), quando as solicitações são maiores que a resistência dos terrenos.

O escorregamento ocorre quando a relação entre a resistência ao cisalhamento do solo e as tensões cisalhantes ao longo da superfície potencial de deslizamento decrescem, até atingir a unidade. Enquanto esta relação decresce, o corpo instável vai sofrendo deformações progressivas, com a movimentação descendente das massas ao longo da superfície de escorregamento. Os escorregamentos podem ser, portanto, provocados pela diminuição da

resistência ao cisalhamento do solo e/ou pelo acréscimo das tensões cisalhantes, (GAIOTO & QUEIROZ, 1993).

Diversos são os fatores que podem ser considerados como condicionantes para os escorregamentos em uma encosta, esses fatores são devidos principalmente aos episódios de chuvas intensas, com o aumento do grau de saturação do solo; aumento na sobrecarga das encostas; mudança na geometria das encostas; descontinuidades da rocha, tais como, falhas, juntas, fraturas e contatos geológicos, e ainda, perda da coesão do solo e acúmulo de depósitos de colúvios nas encostas entre outros.

Na região da Serra do Mar os escorregamentos de massa, muitas vezes, são evidências da gênese e evolução natural das vertentes, sendo as encostas originárias de processos morfogenéticos pretéritos e atuais. Os processos atuais são observados principalmente pela atuação da morfogênese bioquímica, que é gerada pela elevada cobertura vegetal e pelo alto índice pluviométrico, típico de um clima subtropical úmido, onde as vertentes, evoluem por movimentos coletivos rápidos de seu material de origem.

A atuação de processos morfogenéticos pretéritos, no modelado das vertentes, é verificada em toda a região estudada, da Serra do Mar, pelos remanescentes de pedimentos, ou seja, as paleoformas ainda presentes na paisagem, descrita por BIGARELLA (1978).

Para LOPES (1995), as regiões de clima tropical e subtropical úmido, mesmo em condições topográficas acidentadas como, por exemplo, as da Serra do Mar, podem gerar e manter grandes espessuras de regolitos, devido à presença da cobertura vegetal densa e de grande porte que, de um lado, auxilia no processo de intemperismo profundo das rochas e, de outro, protege o material intemperizado da erosão superficial permitindo a sua acumulação.

Segundo o autor citado acima, a capacidade de acumulação do regolito, entretanto, não é infinita, mesmo contando com a cobertura florestal, pois a um determinado nível o pacote se torna instável e busca o reequilíbrio, através do movimento coletivo rápido de massa.

## **1.2 Importância da Vegetação na Estabilidade de Taludes**

Diversos autores referem-se à vegetação da Serra do Mar como um importante fator na contenção de suas encostas pelo alto grau de proteção que esta oferece, principalmente no que diz respeito a interceptação das águas da chuva.

Em um ambiente de densa cobertura florestal, a quantidade de água que escoar na superfície do terreno corresponde apenas a uma pequena parcela do total da precipitação. Parte da água da chuva fica armazenada nas copas arbóreas e/ou arbustivas, sendo perdida pela evaporação e evapotranspiração. Quando a chuva excede a demanda da vegetação, a água atinge o solo atravessando as copas, onde uma parte da água fica armazenada na camada composta pelos detritos orgânicos da Mata Atlântica, e outra parte infiltra no solo e nas rochas. A densidade das raízes da vegetação de alto porte, também ajuda no processo de infiltração da água nos solos.

Em uma paisagem onde o equilíbrio ecológico foi rompido pelo homem, o fluxo de escoamento da água na superfície do terreno é maior, devido a uma rápida saturação do solo. O solo desprovido da cobertura vegetal permite uma excessiva infiltração de água no subsolo até ser atingido o ponto crítico do deslizamento.

Tendo estes fatores em mente, pode-se dizer que a vegetação, principalmente a floresta, reduz o fluxo de água na superfície, retardando o escoamento superficial. Nas regiões de cobertura vegetal removida, o escoamento superficial aumenta consideravelmente, facilitando a capacidade erosiva, sendo mais frequentes nas áreas de altas declividades com elevado índice pluviométrico, como as da Serra do Mar.

Segundo FIORI & BORCHARDT (1997), as encostas portadoras de rica mata pluvial, como é o caso da Serra do Mar sofrem, com frequência, movimentos coletivos de solos e rochas, genericamente chamados de escorregamento, que deixam marcas na morfologia conhecidas como cicatrizes. O fato muitas vezes é consequência da sua própria dinâmica evolutiva, em que massas de solos avolumam-se continuamente devido à ação do intemperismo sobre as rochas, podendo vir a atingir espessuras críticas para a estabilidade das vertentes. Este processo evolutivo das encostas pode ser acelerado pelo desmatamento dessas áreas.

Para BIGARELLA (1978), com a retirada da cobertura vegetal na Serra do Mar inicia-se, em virtude da alta pluviosidade, a remoção rápida e progressiva do material fino do manto de intemperismo. O material clástico é removido, principalmente pelo escoamento difuso superficial e, posteriormente, pelo escoamento concentrado do sistema fluvial que deságua na baía, implicando em uma rápida sedimentação das mesmas.

LOPES (1995) faz referência a um interessante estudo da cobertura vegetal na estabilidade de encosta, feito por CRUZ (1974) na Serra de Caraguatatuba/SP. Este estudo contraria os diversos autores que consideram a cobertura vegetal como um fator primordial na contenção de escorregamentos. Segundo a referida autora, a retirada da floresta e a degradação da camada superficial favorecem uma impermeabilização que acentua o escoamento superficial e diminui a possibilidade de deslizamento. Como exemplo, cita as zonas de pastos ou de capoeira rala que resistiram aos escorregamentos, enquanto nas áreas circunvizinhas, recobertas pela floresta, a movimentação de massa foi grande. Este fato pode ser explicado pelo peso e altura das árvores em vertentes de declives fortes e pela movimentação do solo onde elas se fixam.

FIORI & BORCHARDT (1997), apresentam também, uma importante análise sobre o papel negativo que a vegetação pode desempenhar no índice de segurança das encostas. Conforme estudos realizados pelos autores na região de Guaraqueçaba/ PR, verificou-se que em situação de rajadas de vento de 90Km/h atuando no sentido da declividade, a presença da vegetação, situada em solos residuais, passa a ser um fator negativo na estabilidade de vertente.

AUGUSTO FILHO & VIRGILI (1998), expõem alguns aspectos desfavoráveis da vegetação nas encostas, quais sejam:

- efeito alavanca: força cisalhante transferida pelos troncos das árvores ao terreno, quando suas copas são atingidas por vento;
- efeito cunha: pressão lateral causada pelas raízes ao penetrar em fendas, fissuras e canais do solo ou rocha;
- sobrecarga vertical: causada pelo peso das árvores. Pode ter um efeito benéfico, ou não, na estabilidade, em vista da inclinação das encostas e das características do solo.

### **1.3 Aplicação da Equação de Fatores de Segurança na Avaliação de Instabilidade de Talude**

Em qualquer corpo de rochas ou solos situados sobre um talude, existem duas forças contrárias determinando se o corpo permanecerá estacionário ou se moverá, ou seja, as forças favoráveis ao movimento ( $F_f$ ) e as forças de resistência ao movimento ( $F_r$ ). Destas, as forças favoráveis ao movimento são aquelas que agem para causar movimentos do corpo talude abaixo. O fator primário que influencia as forças favoráveis ao movimento é a gravidade, e esta é relacionada diretamente com o declive do talude. Quando mais íngreme for o talude, maiores serão as forças favoráveis ao movimento.

Outras forças que atuam favoravelmente ao movimento do corpo de rocha ou/e solo, talude abaixo, são as forças devidas ao peso do material e as forças devidas ao escoamento da água, que se somam à força da gravidade.

Quanto às forças de resistência ao movimento, essas são geradas pela resistência interna do corpo a tal movimento e são controladas pelos fatores inerentes do corpo de rocha ou solo. Estes fatores incluem a resistência de fricção, a coesão entre as partículas e a ação das raízes das plantas.

Enquanto as forças favoráveis ao movimento não ultrapassarem as forças de resistência ao movimento, a rocha ou/e solo não se moverão. A razão entre essas duas forças é comumente conhecida como fator de segurança ( $F_s$ ), ou seja:

$$F_s = \text{Forças resistentes ao movimento (Fr)} / \text{Forças favoráveis ao movimento (Ff)}$$

Nas condições de equilíbrio limite de um talude, o fator de segurança ( $F_s$ ) é igual à unidade. Valores de ( $F_s$ ) maiores que 1 indicam que as forças de resistências ao movimento são maiores que as forças favoráveis, estando assim, o talude em equilíbrio. Uma vertente encontra-se em desequilíbrio quando o valor do ( $F_s$ ) for menor que 1, pois as forças solicitantes ao movimento são maiores que as forças resistentes. Quando o ( $F_s$ ) for igual a 1, o deslizamento em uma encosta é iminente, pois as duas forças são iguais.

As forças de resistências poderão ser reduzidas pela diminuição da coesão do solo e das raízes, pelo aumento no declive das encostas e pela saturação e aparecimento da pressão de arraste nos grãos dos solos durante as chuvas intensas, uma vez que a água da chuva induz o surgimento da pressão de percolação ao atravessar solos e rochas.

Para os cálculos dos índices do fator de segurança na estabilidade de taludes foram considerados como variáveis, a inclinação e o ângulo de atrito interno do talude, os índices físicos e as propriedades mecânicas do solo (coesão e peso específico do solo), a presença da água (peso do solo saturado e altura do lençol freático) e a influência da cobertura vegetal (coesão do sistema solo raiz, peso das árvores e a força do vento atuando nas copas das árvores).

O modelo matemático adotado teve por base a distribuição das forças atuantes em um talude de extensão infinita, avaliando a influência da vegetação, da água e das propriedades físicas e mecânicas do solo, através da equação de Fator de Segurança a seguir:

$$FS = \frac{Cs + Sr + \left( \gamma_{sub} \cdot h_2 + \frac{\sigma a}{\cos i} \right) \cos^2 i \cdot \tan \phi}{\left[ \left( h_2 \cdot \gamma_{sat} + \frac{\sigma a}{\cos i} \right) \sin i + \frac{\sigma ve}{\cos i} \right] \cos i} \quad (\text{equação 03})$$

em que:

Fs = fator de segurança

Cs = coesão do solo

Sr = contribuição da raiz para a coesão do solo

$\gamma_{sub}$  = peso do solo submerso

$\gamma_{sat}$  = peso do solo saturado

$h_2$  = altura do lençol freático

$i$  = ângulo de inclinação da encosta

$\phi$  = ângulo de atrito interno

$\sigma a$  = pressão exercida pelo peso das árvores sobre a encosta

$\sigma ve$  = pressão exercida pelo vento sobre as árvores

De acordo com DUNN, ANDRESON & KIEFER *apud* FIORI & CARMIGNANI (2001), qualquer talude de grande extensão, e com perfil de solo essencialmente do mesmo tipo, pode ser considerado como um talude de extensão infinita.

- Coesão do solo:

A coesão do solo é uma das componentes de resistência ao cisalhamento, sendo característica típica dos solos muito finos (argila e silte), estando assim, diretamente ligada a consistência do solo.

Conforme CAPUTO (1988), a coesão do solo pode ser distinguida em coesão aparente e coesão verdadeira. A primeira, resulta da pressão capilar da água contida nos solos, e que age como se fosse uma pressão externa. A segunda, é devida às forças eletroquímicas de atração das partículas da argila e depende de fatores como a física do solo e a química coloidal.

- Ângulo de Atrito Interno:

O ângulo de atrito interno é o ângulo cuja tangente constitui a razão entre as forças de resistência ao deslizamento, ao longo do plano da encosta, com as componentes das forças favoráveis ao movimento, exercidas sobre este plano.

- Ângulo de Inclinação da Vertente:

É o ângulo mantido entre a vertente e a superfície horizontal. Os ângulos de inclinação das vertentes foram determinados pelo mapa de declividade, gerado em ambiente SIG (figura 46).

- Peso do solo:

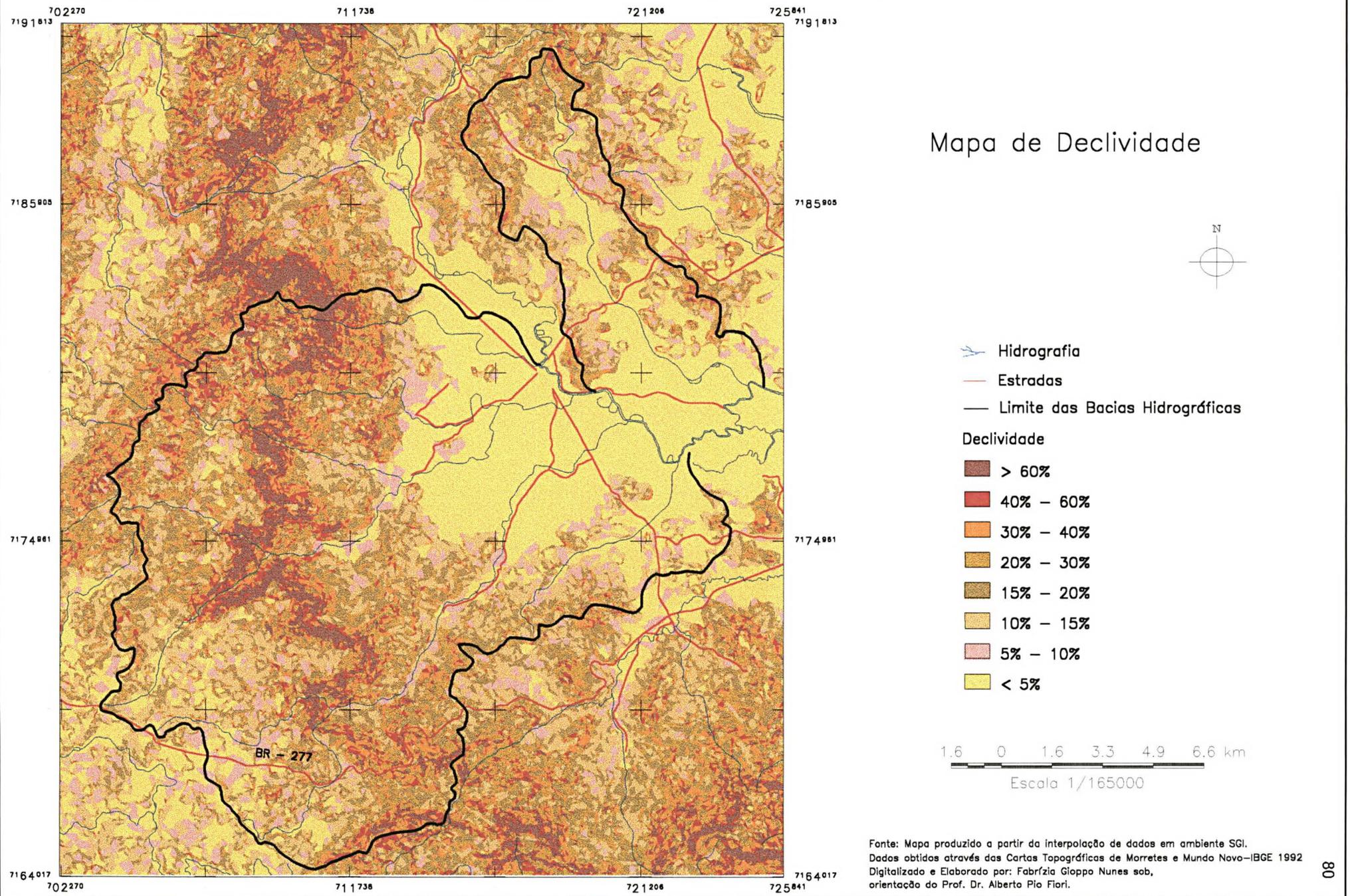
O peso específico natural de cada unidade de solo, foi obtido como descrito no capítulo anterior.

No caso de solo saturado, considerou-se que  $\gamma_{nat} = \gamma_{sat}$  e  $\gamma_{sub}/\gamma_{sat} = 1/2$ , conforme CHOWDHURY *apud* FIORI & CARMIGNANI (2001).

- Altura do lençol freático:

A altura do lençol freático foi considerada para períodos de chuva intensa com solos saturados, sendo a altura do lençol freático ( $h_2$ ) igual à altura da camada de solo.

Figura 46 - Mapa de Declividade da Área de Estudo



- Contribuição da raiz para a coesão do solo:

A contribuição da raiz para a coesão do solo pode ser avaliada com base em testes de campo. WU et al. (1997), verificaram que o comprimento da raiz perpendicular a zona de cisalhamento, poderá alcançar um comprimento de cerca de 15 cm a mais que a espessura da zona de cisalhamento, antes de ocorrer à ruptura da raiz.

Os autores op. cit; consideraram ainda que a espessura de uma zona de cisalhamento, em escorregamento de solo, deverá se situar entre 7,5 e 30cm. Desta forma o cisalhamento angular no momento da ruptura da raiz deverá variar entre 71°e 48°, respectivamente.

A partir de relações trigonométricas extraídas de um modelo de sistema solo/raiz, sujeito a cisalhamento simples, segundo FIORI & BORCHARDT (1997), tem-se que:

$$\sigma_r = tr \cos\psi \quad \text{(equação 04)}$$

$$\tau_r = tr \sen\psi \quad \text{(equação 05)}$$

Onde:

$\sigma_r$  é o esforço normal

$\tau_r$  é o esforço tangencial

$tr$  é resistência a tração da raiz

$\psi$  é o cisalhamento angular

A contribuição da raiz na resistência ao cisalhamento do solo, foi estimada a partir da equação de COULOMB descrita em FIORI & BORCHARDT (1997), onde:

$$S_r = \tau_r + \sigma_r \cdot \operatorname{tg}\phi \quad \text{(equação 06)}$$

Substituindo nesta equação as equações 04 e 05, tem-se que:

$$S_r = tr (\cos\psi \operatorname{tg}\phi + \sen\psi) \quad \text{(equação 07)}$$

Uma vez que o valor da relação de  $(\cos\psi\text{tg}\phi + \text{sen}\psi)$  é praticamente insensível para valores de cisalhamento angular entre 48° e 71°, o seu valor estará próximo a 1,2 para os ângulos de cisalhamento entre 48° e 71°.

Logo:

$$S_r = 1,2 \cdot tr \quad (\text{equação 08})$$

Segundo (WU et al., 1997), o valor de (tr) deverá se situar entre 4,2 e 5,5 KPa com uma média de 4,9 KPa. A partir da substituição do valor médio na equação acima, obtém-se:

$$S_r = 5,9 \text{ KPa} \quad (\text{equação 09})$$

- Pressão exercida pelo peso das árvores sobre a encosta:

A pressão exercida pelo peso das árvores ( $\sigma_a$ ) sobre uma encosta de inclinação ( $i$ ), pode ser avaliada a partir do peso das árvores ( $Pa$ ), multiplicado pela área da seção da encosta ( $1/\cos i$ ), ou seja:

$$Pa = \frac{\sigma_a}{\cos i} \quad (\text{equação 10})$$

Diversos valores de ( $\sigma_a$ ) foram estimados por alguns pesquisadores, sendo estes valores encontrados em torno de 2,5 KPa (BISHOP & STEVENS, 1964); 5,2 KPa (WU et al., 1979) e de 3,0 KPa na Serra do Mar (WOLLE & PEDROSA, 1981). Para efeito de cálculo, no presente trabalho considerou-se uma média desses valores de 3,6 KPa.

- Pressão exercida pelo vento sobre as árvores:

A força exercida pelo vento sobre as árvores ( $F_{ve}$ ) é transmitida ao solo, quando o vento sopra no mesmo sentido da inclinação das encostas, devendo esta força ser adicionada às forças favoráveis ao movimento.

A força exercida pelo vento sobre as árvores ( $F_{ve}$ ) é determinada através da razão entre a pressão exercida pelo vento ( $\sigma_{ve}$ ), nas copas das árvores, com a área da seção da vertente ( $1/\cos i$ ), tendo-se:

$$F_{ve} = \frac{\sigma_{ve}}{\cos i} \quad (\text{equação 11})$$

A pressão de arrasto do vento nas árvores, foi investigada através de experimentos com florestas modelos, em túneis de vento (HSI & NATH, 1970). Os dados obtidos pelos experimentos são então submetidos em uma equação que determina o valor da  $\sigma_{ve}$  (ver por exemplo in. FIORI & BORCHARDT, 1997), sendo a pressão de arrasto do vento dada por:

$$\sigma_{ve} = C \left( \frac{\rho \mu_a^2}{2} \right) \quad (\text{equação 12})$$

Onde, C é o coeficiente de arrasto, possuindo valores de 0,30 e 0,15 KPa,  $\rho$  a densidade do ar ( $0,00123 \text{ g/cm}^3$ ) e  $\mu_a$  a velocidade do vento.

FENDRICH & FERREIRA (1995), realizaram levantamentos de dados da velocidade do vento na estação climatológica de Morretes, revelando uma velocidade de 50,4 km/h, sendo muito freqüente pico de velocidade de 90 km/h

Simulando-se uma das piores situações, considerou-se aqui, o valor da velocidade do vento de 90 km/h, na aplicação da equação que determina a pressão de arrasto do vento, obtendo-se o valor de  $\sigma_{ve}$  igual a 1KPa.

Estudos feitos por STYCZEN & MORGAM *apud* FIORI & BORCHARDT (1997), revelam que a força do vento somente tem significado para o aumento das forças favoráveis ao movimento, quando este sopra na direção do declive da encosta a partir de uma velocidade de 40 km/h.

A aplicação da equação de Fator de Segurança (Fs) para cada unidade de solo, considerando situações de estabilidade de talude com e sem vegetação em períodos de chuva intensa, ou seja, de solo saturado, resultou nos índices de segurança ilustrados nas tabelas 34 a 57. Foi levado em conta nas equações de Fs o período de chuva intensa, devido ao alto índice pluviométrico da área, como descrito no capítulo II, considerando-se que o solo venha a ser saturado em algum momento durante este período. Esta situação é a pior possível em termos de estabilidade de talude, e é quando ocorre com maior probabilidade os escorregamentos.

Tabela 34- Índices de segurança determinados para vertentes com vegetação, período de chuva intensa (unidade de solo Af)  $C_s = 88 \text{ KPa}$ ;  $\phi = 18^\circ$ ;  $h_2 = 0,5\text{m}$ ;  $\gamma_{\text{sat}} = 15,5 \text{ KN/m}^3$ ;  $\gamma_{\text{sub}} = 7,75 \text{ KN/m}^3$

Inclinação do terreno (°)	Inclinação do terreno (%)	Índices de segurança em situação de solos saturados
< 2° 51'	< 5%	> 62
2° 51' - 5° 42'	5% - 10%	62 - 45
5° 42' - 8° 31'	10% - 15%	45 - 36
8° 31' - 11° 18'	15% - 20%	36 - 30
11° 18' - 16° 42'	20% - 30%	30 - 23
16° 42' - 21° 48'	30% - 40%	23 - 19
21° 48' - 30° 57'	40% - 60%	19 - 15
>30° 57'	> 60%	< 15

Tabela 35- Índices de segurança determinados para vertentes com vegetação, período de chuva intensa (unidade de solo Ca1)  $C_s = 28 \text{ KPa}$ ;  $\phi = 14^\circ$ ;  $h_2 = 1\text{m}$ ;  $\gamma_{\text{sat}} = 17,6 \text{ KN/m}^3$ ;  $\gamma_{\text{sub}} = 8,8 \text{ KN/m}^3$

Inclinação do terreno (°)	Inclinação do terreno (%)	Índices de segurança em situação de solos saturados
< 2° 51'	< 5%	> 18
2° 51' - 5° 42'	5% - 10%	18 - 12
5° 42' - 8° 31'	10% - 15%	12 - 9
8° 31' - 11° 18'	15% - 20%	9 - 7
11° 18' - 16° 42'	20% - 30%	7 - 5
16° 42' - 21° 48'	30% - 40%	5 - 4
21° 48' - 30° 57'	40% - 60%	4 - 3
>30° 57'	> 60%	< 3

Tabela 36- Índices de segurança determinados para vertentes com vegetação, período de chuva intensa (unidade de solo Ca3)  $C_s = 3,2 \text{ KPa}$ ;  $\phi = 17^\circ$ ;  $h_2 = 1\text{m}$ ;  $\gamma_{\text{sat}} = 17,6 \text{ KN/m}^3$ ;  $\gamma_{\text{sub}} = 8,8 \text{ KN/m}^3$

Inclinação do terreno (°)	Inclinação do terreno (%)	Índices de segurança em situação de solos saturados
< 2° 51'	< 5%	> 6
2° 51' - 5° 42'	5% - 10%	6 - 4
5° 42' - 8° 31'	10% - 15%	4 - 3
8° 31' - 11° 18'	15% - 20%	3 - 2,5
11° 18' - 16° 42'	20% - 30%	2,5 - 2
16° 42' - 21° 48'	30% - 40%	2 - 1,5
21° 48' - 30° 57'	40% - 60%	1,5 - 1
>30° 57'	> 60%	< 1

Tabela 37- Índices de segurança determinados para vertentes com vegetação, período de chuva intensa (unidade de solo Ca5)  $C_s = 11 \text{ KPa}$ ;  $\phi = 30^\circ$ ;  $h_2 = 1,5\text{m}$ ;  $\gamma_{\text{sat}} = 17,6 \text{ KN/m}^3$ ;  $\gamma_{\text{sub}} = 8,8 \text{ KN/m}^3$

Inclinação do terreno (°)	Inclinação do terreno (%)	Índices de segurança em situação de solos saturados
< 2° 51'	< 5%	> 11,5
2° 51' - 5° 42'	5% - 10%	11,5 - 7
5° 42' - 8° 31'	10% - 15%	7 - 5
8° 31' - 11° 18'	15% - 20%	5 - 4
11° 18' - 16° 42'	20% - 30%	4 - 3
16° 42' - 21° 48'	30% - 40%	3 - 2
21° 48' - 30° 57'	40% - 60%	2 - 1,5
>30° 57'	> 60%	< 1,5

Tabela 38- Índices de segurança determinados para vertentes com vegetação, período de chuva intensa (unidade de solo Ca8)  $C_s = 24 \text{ KPa}$ ;  $\phi = 27^\circ$ ;  $h_2 = 1\text{m}$ ;  $\gamma_{\text{sat}} = 17,6 \text{ KN/m}^3$ ;  $\gamma_{\text{sub}} = 8,8 \text{ KN/m}^3$

Inclinação do terreno (°)	Inclinação do terreno (%)	Índices de segurança em situação de solos saturados
< 2° 51'	< 5%	> 17,5
2° 51' - 5° 42'	5% - 10%	17,5 - 11,5
5° 42' - 8° 31'	10% - 15%	11,5 - 9
8° 31' - 11° 18'	15% - 20%	9 - 7
11° 18' - 16° 42'	20% - 30%	7 - 5
16° 42' - 21° 48'	30% - 40%	5 - 4
21° 48' - 30° 57'	40% - 60%	4 - 3
> 30° 57'	> 60%	< 3

Tabela 39- Índices de segurança determinados para vertentes com vegetação, período de chuva intensa (unidade de solo Cd)  $C_s = 10,5 \text{ KPa}$ ;  $\phi = 19^\circ$ ;  $h_2 = 2\text{m}$ ;  $\gamma_{\text{sat}} = 18 \text{ KN/m}^3$ ;  $\gamma_{\text{sub}} = 9 \text{ KN/m}^3$

Inclinação do terreno (°)	Inclinação do terreno (%)	Índices de segurança em situação de solos saturados
< 2° 51'	< 5%	> 8
2° 51' - 5° 42'	5% - 10%	8 - 5
5° 42' - 8° 31'	10% - 15%	5 - 3,5
8° 31' - 11° 18'	15% - 20%	3,5 - 3
11° 18' - 16° 42'	20% - 30%	3 - 2
16° 42' - 21° 48'	30% - 40%	2 - 1,5
21° 48' - 30° 57'	40% - 60%	1,5 - 1
> 30° 57'	> 60%	< 1

Tabela 40- Índices de segurança determinados para vertentes com vegetação, período de chuva intensa (unidade de solo PVa2)  $C_s = 14,5 \text{ KPa}$ ;  $\phi = 23^\circ$ ;  $h_2 = 2\text{m}$ ;  $\gamma_{\text{sat}} = 18 \text{ KN/m}^3$ ;  $\gamma_{\text{sub}} = 9 \text{ KN/m}^3$

Inclinação do terreno (°)	Inclinação do terreno (%)	Índices de segurança em situação de solos saturados
< 2° 51'	< 5%	> 10
2° 51' - 5° 42'	5% - 10%	10 - 6
5° 42' - 8° 31'	10% - 15%	6 - 4
8° 31' - 11° 18'	15% - 20%	4 - 3
11° 18' - 16° 42'	20% - 30%	3 - 2,5
16° 42' - 21° 48'	30% - 40%	2,5 - 2
21° 48' - 30° 57'	40% - 60%	2 - 1
> 30° 57'	> 60%	< 1

Tabela 41- Índices de segurança determinados para vertentes com vegetação, período de chuva intensa (unidade de solo PVa5)  $C_s = 10 \text{ KPa}$ ;  $\phi = 14^\circ$ ;  $h_2 = 2\text{m}$ ;  $\gamma_{\text{sat}} = 18 \text{ KN/m}^3$ ;  $\gamma_{\text{sub}} = 9 \text{ KN/m}^3$

Inclinação do terreno (°)	Inclinação do terreno (%)	Índices de segurança em situação de solos saturados
< 2° 51'	< 5%	> 7
2° 51' - 5° 42'	5% - 10%	7 - 4
5° 42' - 8° 31'	10% - 15%	4 - 3
8° 31' - 11° 18'	15% - 20%	3 - 2,5
11° 18' - 16° 42'	20% - 30%	2,5 - 2
16° 42' - 21° 48'	30% - 40%	2 - 1,5
21° 48' - 30° 57'	40% - 60%	1,5 - 1
> 30° 57'	> 60%	< 1

Em caso de vertente saturada, mas sem vegetação, os valores de  $S_r$ ,  $P_a$  e  $F_{ve}$  são iguais a zero. Assim, a equação 3 exposta na página 78 transforma-se em:

$$FS = \frac{C_s + \gamma_{sub} h_2 \cdot \cos i \cdot \tan \phi}{h_2 \cdot \gamma_{sat} \cdot \sin i} \quad (\text{equação 13})$$

O objetivo da aplicação dessa equação é a comparação dos índices de segurança para as mesmas vertentes, com e sem vegetação.

Tabela 42- Índices de segurança determinados para vertentes sem vegetação, período de chuva intensa (unidade de solo Af)  $C_s = 88 \text{ KPa}$ ;  $\phi = 18^\circ$ ;  $h_2 = 0,5\text{m}$ ;  $\gamma_{sat} = 15,5 \text{ KN/m}^3$ ;  $\gamma_{sub} = 7,75 \text{ KN/m}^3$

Inclinação do terreno (°)	Inclinação do terreno (%)	Índices de segurança em situação de solos saturados
< 2° 51'	< 5%	> 231,5
2° 51' - 5° 42'	5% - 10%	231,5 - 116
5° 42' - 8° 31'	10% - 15%	116 - 77
8° 31' - 11° 18'	15% - 20%	77 - 58,5
11° 18' - 16° 42'	20% - 30%	58,5 - 40
16° 42' - 21° 48'	30% - 40%	40 - 31
21° 48' - 30° 57'	40% - 60%	31 - 22
> 30° 57'	> 60%	< 22

Tabela 43- Índices de segurança determinados para vertentes sem vegetação, período de chuva intensa (unidade de solo Ca1)  $C_s = 28 \text{ KPa}$ ;  $\phi = 14^\circ$ ;  $h_2 = 1\text{m}$ ;  $\gamma_{sat} = 17,6 \text{ KN/m}^3$ ;  $\gamma_{sub} = 8,8 \text{ KN/m}^3$

Inclinação do terreno (°)	Inclinação do terreno (%)	Índices de segurança em situação de solos saturados
< 2° 51'	< 5%	> 34
2° 51' - 5° 42'	5% - 10%	34 - 17
5° 42' - 8° 31'	10% - 15%	17 - 11
8° 31' - 11° 18'	15% - 20%	11 - 9
11° 18' - 16° 42'	20% - 30%	9 - 6
16° 42' - 21° 48'	30% - 40%	6 - 4,5
21° 48' - 30° 57'	40% - 60%	4,5 - 3,5
> 30° 57'	> 60%	< 3,5

Tabela 44- Índices de segurança determinados para vertentes sem vegetação, período de chuva intensa (unidade de solo Ca3)  $C_s = 3,2 \text{ KPa}$ ;  $\phi = 17^\circ$ ;  $h_2 = 1\text{m}$ ;  $\gamma_{sat} = 17,6 \text{ KN/m}^3$ ;  $\gamma_{sub} = 8,8 \text{ KN/m}^3$

Inclinação do terreno (°)	Inclinação do terreno (%)	Índices de segurança em situação de solos saturados
< 2° 51'	< 5%	> 6,5
2° 51' - 5° 42'	5% - 10%	7 - 3
5° 42' - 8° 31'	10% - 15%	3 - 2
8° 31' - 11° 18'	15% - 20%	2 - 1,5
11° 18' - 16° 42'	20% - 30%	1,5 - 1
16° 42' - 21° 48'	30% - 40%	1 - 0,87
21° 48' - 30° 57'	40% - 60%	0,87 - 0,6
> 30° 57'	> 60%	< 0,6

Tabela 45- Índices de segurança determinados para vertentes sem vegetação, período de chuva intensa (unidade de solo Ca5)  $C_s = 11 \text{ KPa}$ ;  $\phi = 30^\circ$ ;  $h_2 = 1,5\text{m}$ ;  $\gamma_{\text{sat}} = 17,6 \text{ KN/m}^3$ ;  $\gamma_{\text{sub}} = 8,8 \text{ KN/m}^3$

Inclinação do terreno (°)	Inclinação do terreno (%)	Índices de segurança em situação de solos saturados
< 2° 51'	< 5%	> 14
2° 51' - 5° 42'	5% - 10%	14 - 7
5° 42' - 8° 31'	10% - 15%	7 - 4,5
8° 31' - 11° 18'	15% - 20%	4,5 - 3,5
11° 18' - 16° 42'	20% - 30%	3,5 - 2,5
16° 42' - 21° 48'	30% - 40%	2,5 - 2
21° 48' - 30° 57'	40% - 60%	2 - 1
> 30° 57'	> 60%	< 1

Tabela 46- Índices de segurança determinados para vertentes sem vegetação, período de chuva intensa (unidade de solo Ca8)  $C_s = 24 \text{ KPa}$ ;  $\phi = 27^\circ$ ;  $h_2 = 1\text{m}$ ;  $\gamma_{\text{sat}} = 17,6 \text{ KN/m}^3$ ;  $\gamma_{\text{sub}} = 8,8 \text{ KN/m}^3$

Inclinação do terreno (°)	Inclinação do terreno (%)	Índices de segurança em situação de solos saturados
< 2° 51'	< 5%	> 32,5
2° 51' - 5° 42'	5% - 10%	32,5 - 16
5° 42' - 8° 31'	10% - 15%	16 - 11
8° 31' - 11° 18'	15% - 20%	11 - 8
11° 18' - 16° 42'	20% - 30%	8 - 5
16° 42' - 21° 48'	30% - 40%	5 - 4
21° 48' - 30° 57'	40% - 60%	4 - 3
> 30° 57'	> 60%	< 3

Tabela 47- Índices de segurança determinados para vertentes sem vegetação, período de chuva intensa (unidade de solo Cd)  $C_s = 10,5 \text{ KPa}$ ;  $\phi = 19^\circ$ ;  $h_2 = 2\text{m}$ ;  $\gamma_{\text{sat}} = 18 \text{ KN/m}^3$ ;  $\gamma_{\text{sub}} = 9 \text{ KN/m}^3$

Inclinação do terreno (°)	Inclinação do terreno (%)	Índices de segurança em situação de solos saturados
< 2° 51'	< 5%	> 9
2° 51' - 5° 42'	5% - 10%	9 - 4,5
5° 42' - 8° 31'	10% - 15%	4,5 - 3
8° 31' - 11° 18'	15% - 20%	3 - 2
11° 18' - 16° 42'	20% - 30%	2 - 1,5
16° 42' - 21° 48'	30% - 40%	1,5 - 1
21° 48' - 30° 57'	40% - 60%	1 - 0,85
> 30° 57'	> 60%	< 0,85

Tabela 48- Índices de segurança determinados para vertentes sem vegetação, período de chuva intensa (unidade de solo PVa2)  $C_s = 14,5 \text{ KPa}$ ;  $\phi = 23^\circ$ ;  $h_2 = 2\text{m}$ ;  $\gamma_{\text{sat}} = 18 \text{ KN/m}^3$ ;  $\gamma_{\text{sub}} = 9 \text{ KN/m}^3$

Inclinação do terreno (°)	Inclinação do terreno (%)	Índices de segurança em situação de solos saturados
< 2° 51'	< 5%	> 12
2° 51' - 5° 42'	5% - 10%	12 - 6
5° 42' - 8° 31'	10% - 15%	6 - 4
8° 31' - 11° 18'	15% - 20%	4 - 3
11° 18' - 16° 42'	20% - 30%	3 - 2
16° 42' - 21° 48'	30% - 40%	2 - 1,5
21° 48' - 30° 57'	40% - 60%	1,5 - 0,98
> 30° 57'	> 60%	< 1

Tabela 49- Índices de segurança determinados para vertentes sem vegetação, período de chuva intensa (unidade de solo PVa5)  $C_s = 10 \text{ KPa}$ ;  $\phi = 14^\circ$ ;  $h_2 = 2\text{m}$ ;  $\gamma_{\text{sat}} = 18 \text{ KN/m}^3$ ;  $\gamma_{\text{sub}} = 9 \text{ KN/m}^3$

Inclinação do terreno ( $^\circ$ )	Inclinação do terreno (%)	Índices de segurança em situação de solos saturados
$< 2^\circ 51'$	$< 5\%$	$> 8$
$2^\circ 51' - 5^\circ 42'$	$5\% - 10\%$	$8 - 4$
$5^\circ 42' - 8^\circ 31'$	$10\% - 15\%$	$4 - 3$
$8^\circ 31' - 11^\circ 18'$	$15\% - 20\%$	$3 - 2$
$11^\circ 18' - 16^\circ 42'$	$20\% - 30\%$	$2 - 1,5$
$16^\circ 42' - 21^\circ 48'$	$30\% - 40\%$	$1,5 - 1$
$21^\circ 48' - 30^\circ 57'$	$40\% - 60\%$	$1 - 0,75$
$> 30^\circ 57'$	$> 60\%$	$< 0,75$

Os valores dos fatores de segurança (FS), são bastante influenciados pela espessura dos solos. Foram tomados como base às espessuras de solos descritos pela Embrapa (1984), cujos solos mais espessos não ultrapassam dois metros de espessura. Deve-se considerar que nesses cálculos não se está levando em consideração o horizonte C do solo, que é de pouca importância para a pedologia, mas de grande significado em termos geotécnicos. O horizonte C não foi levado em consideração por falta de informações precisas sobre sua espessura.

De um modo geral, quando a espessura do solo atinge valores próximos da ordem de dois metros, tem-se verificado, em trabalho de campo, que a espessura do horizonte C é da ordem de 2 metros. Tendo-se isto em vista, foram recalculados os índices de segurança somando-se esses dois metros na espessura total do solo.

Já nos solos com espessura igual ou inferior a 1 m, o horizonte C apresenta-se pouco evoluído e de espessura reduzida, sendo assim, de pouca relevância para efeito de cálculos de fator de segurança. Os novos índices de segurança, com as espessuras corrigidas, são apresentados nas tabelas 50 a 57.

Tabela 50- Índices de segurança determinados para vertentes com vegetação, período de chuva intensa (unidade de solo Ca5)  $C_s = 11 \text{ KPa}$ ;  $\phi = 30^\circ$ ;  $h_2 = 3,5\text{m}$ ;  $\gamma_{\text{sat}} = 17,6 \text{ KN/m}^3$ ;  $\gamma_{\text{sub}} = 8,8 \text{ KN/m}^3$

Inclinação do Terreno ( $^\circ$ )	Inclinação do terreno (%)	Índices de segurança em situação de solos saturados
$< 2^\circ 51'$	$< 5\%$	$> 8,5$
$2^\circ 51' - 5^\circ 42'$	$5\% - 10\%$	$8,5 - 5$
$5^\circ 42' - 8^\circ 31'$	$10\% - 15\%$	$5 - 3,5$
$8^\circ 31' - 11^\circ 18'$	$15\% - 20\%$	$3,5 - 2,5$
$11^\circ 18' - 16^\circ 42'$	$20\% - 30\%$	$2,5 - 1,8$
$16^\circ 42' - 21^\circ 48'$	$30\% - 40\%$	$1,8 - 1,5$
$21^\circ 48' - 30^\circ 57'$	$40\% - 60\%$	$1,5 - 1$
$> 30^\circ 57'$	$> 60\%$	$< 1$

Tabela 51- Índices de segurança determinados para vertentes com vegetação, período de chuva intensa (unidade de solo Cd)  $C_s = 10,5 \text{ KPa}$ ;  $\phi = 19^\circ$ ;  $h_2 = 4\text{m}$ ;  $\gamma_{\text{sat}} = 18 \text{ KN/m}^3$ ;  $\gamma_{\text{sub}} = 9 \text{ KN/m}^3$

Inclinação do Terreno (°)	Inclinação do terreno (%)	Índices de segurança em situação de solos saturados
< 2° 51'	< 5%	> 6,5
2° 51' - 5° 42'	5% - 10%	6,5 - 3,5
5° 42' - 8° 31'	10% - 15%	3,5 - 2,5
8° 31' - 11° 18'	15% - 20%	2,5 - 2
11° 18' - 16° 42'	20% - 30%	2 - 1,3
16° 42' - 21° 48'	30% - 40%	1,3 - 1
21° 48' - 30° 57'	40% - 60%	1 - 0,77
> 30° 57'	> 60%	< 0,77

Tabela 52- Índices de segurança determinados para vertentes com vegetação, período de chuva intensa (unidade de solo PVa2)  $C_s = 14,5 \text{ KPa}$ ;  $\phi = 23^\circ$ ;  $h_2 = 4\text{m}$ ;  $\gamma_{\text{sat}} = 18 \text{ KN/m}^3$ ;  $\gamma_{\text{sub}} = 9 \text{ KN/m}^3$

Inclinação do Terreno (°)	Inclinação do terreno (%)	Índices de segurança em situação de solos saturados
< 2° 51'	< 5%	> 7,7
2° 51' - 5° 42'	5% - 10%	7,7 - 4,3
5° 42' - 8° 31'	10% - 15%	4,3 - 3
8° 31' - 11° 18'	15% - 20%	3 - 2
11° 18' - 16° 42'	20% - 30%	2 - 1,6
16° 42' - 21° 48'	30% - 40%	1,6 - 1
21° 48' - 30° 57'	40% - 60%	1 - 0,94
> 30° 57'	> 60%	< 0,94

Tabela 53- Índices de segurança determinados para vertentes com vegetação, período de chuva intensa (unidade de solo PVa5)  $C_s = 10 \text{ KPa}$ ;  $\phi = 14^\circ$ ;  $h_2 = 4\text{m}$ ;  $\gamma_{\text{sat}} = 18 \text{ KN/m}^3$ ;  $\gamma_{\text{sub}} = 9 \text{ KN/m}^3$

Inclinação do Terreno (°)	Inclinação do terreno (%)	Índices de segurança em situação de solos saturados
< 2° 51'	< 5%	> 5,5
2° 51' - 5° 42'	5% - 10%	5,5 - 3
5° 42' - 8° 31'	10% - 15%	3 - 2
8° 31' - 11° 18'	15% - 20%	2 - 1,5
11° 18' - 16° 42'	20% - 30%	1,5 - 1
16° 42' - 21° 48'	30% - 40%	1 - 0,9
21° 48' - 30° 57'	40% - 60%	0,9 - 0,67
> 30° 57'	> 60%	< 0,67

Tabela 54- Índices de segurança determinados para vertentes sem vegetação, período de chuva intensa (unidade de solo Ca5)  $C_s = 11 \text{ KPa}$ ;  $\phi = 30^\circ$ ;  $h_2 = 3,5\text{m}$ ;  $\gamma_{\text{sat}} = 17,6 \text{ KN/m}^3$ ;  $\gamma_{\text{sub}} = 8,8 \text{ KN/m}^3$

Inclinação do Terreno (°)	Inclinação do terreno (%)	Índices de segurança em situação de solos saturados
< 2° 51'	< 5%	> 9,4
2° 51' - 5° 42'	5% - 10%	9,4 - 4,7
5° 42' - 8° 31'	10% - 15%	4,7 - 3
8° 31' - 11° 18'	15% - 20%	3 - 2,3
11° 18' - 16° 42'	20% - 30%	2,3 - 1,5
16° 42' - 21° 48'	30% - 40%	1,5 - 1
21° 48' - 30° 57'	40% - 60%	1 - 0,82
> 30° 57'	> 60%	< 0,82

Tabela 55- Índices de segurança determinados para vertentes sem vegetação, período de chuva intensa (unidade de solo Cd)  $C_s = 10,5 \text{ KPa}$ ;  $\phi = 19^\circ$ ;  $h_2 = 4\text{m}$ ;  $\gamma_{\text{sat}} = 18 \text{ KN/m}^3$ ;  $\gamma_{\text{sub}} = 9 \text{ KN/m}^3$

Inclinação do Terreno (°)	Inclinação do terreno (%)	Índices de segurança em situação de solos saturados
< 2° 51'	< 5%	> 6,4
2° 51' - 5° 42'	5% - 10%	6,4 - 3
5° 42' - 8° 31'	10% - 15%	3 - 2
8° 31' - 11° 18'	15% - 20%	2 - 1,5
11° 18' - 16° 42'	20% - 30%	1,5 - 1
16° 42' - 21° 48'	30% - 40%	1 - 0,84
21° 48' - 30° 57'	40% - 60%	0,84 - 0,5
> 30° 57'	> 60%	< 0,5

Tabela 56-: Índices de segurança determinados para vertentes sem vegetação, período de chuva intensa (unidade de solo PVa2)  $C_s = 14,5 \text{ KPa}$ ;  $\phi = 23^\circ$ ;  $h_2 = 4\text{m}$ ;  $\gamma_{\text{sat}} = 18 \text{ KN/m}^3$ ;  $\gamma_{\text{sub}} = 9 \text{ KN/m}^3$

Inclinação do Terreno (°)	Inclinação do terreno (%)	Índices de segurança em situação de solos saturados
< 2° 51'	< 5%	> 8,3
2° 51' - 5° 42'	5% - 10%	8,3 - 4
5° 42' - 8° 31'	10% - 15%	4 - 2,7
8° 31' - 11° 18'	15% - 20%	2,7 - 2
11° 18' - 16° 42'	20% - 30%	2 - 1,4
16° 42' - 21° 48'	30% - 40%	1,4 - 1
21° 48' - 30° 57'	40% - 60%	1 - 0,74
> 30° 57'	> 60%	< 0,74

Tabela 57- Índices de segurança determinados para vertentes sem vegetação, período de chuva intensa (unidade de solo PVa5)  $C_s = 10 \text{ KPa}$ ;  $\phi = 14^\circ$ ;  $h_2 = 4\text{m}$ ;  $\gamma_{\text{sat}} = 18 \text{ KN/m}^3$ ;  $\gamma_{\text{sub}} = 9 \text{ KN/m}^3$

Inclinação do Terreno (°)	Inclinação do terreno (%)	Índices de segurança em situação de solos saturados
< 2° 51'	< 5%	> 5,3
2° 51' - 5° 42'	5% - 10%	5,3 - 2,6
5° 42' - 8° 31'	10% - 15%	2,6 - 1,8
8° 31' - 11° 18'	15% - 20%	1,8 - 1,3
11° 18' - 16° 42'	20% - 30%	1,3 - 0,89
16° 42' - 21° 48'	30% - 40%	0,89 - 0,68
21° 48' - 30° 57'	40% - 60%	0,68 - 0,48
> 30° 57'	> 60%	< 0,48

## **2. Análise e Discussão dos Resultados**

### **2.1 Análise e Discussão dos Resultados da Equação de Fatores de Segurança (Fs)**

A análise das tabelas dos fatores de segurança (Fs) para cada unidade de solos mostrou que:

- Na presença da vegetação de porte arbóreo em solos de baixa coesão e de espessura superior a 1m, desconsiderando o horizonte C, o fator de segurança é menor que 1, somente a partir de um declive maior que 60% (30° 57'). Já nas outras unidades de solos, com espessura inferior ou igual a 1m, associadas a uma alta coesão do solo, o fator de segurança é sempre maior que 1, mesmo em declives superiores a 60% (30° 57').

- Em encostas desprovidas de vegetação de porte arbóreo com solos de baixa coesão e elevada espessura, ou seja, solos com espessura superior a 1m, desconsiderando aqui o horizonte C, o fator de segurança menor que 1 é encontrado a partir da declividade de 40% (21° 48°) diminuindo gradativamente conforme aumenta a declividade.

- Na ausência da vegetação de porte arbóreo, em solos pouco espessos com coesão elevada, o fator de segurança teve um aumento significativo em relação às encostas com vegetação, independente do seu grau de declive, sendo o fator de segurança maior que 1 em declives superiores a 60% (30° 57').

- Nas encostas com vegetação de porte arbóreo, em solos pouco espessos mas com coesão baixa como o solo Ca3, o fator de segurança é menor que 1 só a partir de uma declividade superior a 60% (30° 57'). Considerando essas mesmas situações mas sem a presença da vegetação, verificou-se uma diminuição significativa no fator de segurança, sendo o mesmo menor que 1 em declive de 30% (16° 42').

- Pelos recálculos do fator de segurança nos solos mais espessos, levando em conta agora o horizonte C, observou-se que o fator de segurança apresentou-se bem menor em relação aos demais cálculos, tanto para as encostas com ou sem vegetação, demonstrando assim, a importância do horizonte C nos cálculos de estabilidade.

- Nestas mesmas condições de solos, o fator de segurança é mais elevado para encostas com vegetação do que encostas sem vegetação, mostrando um fator de segurança menor que 1, a partir das declives de 30° 57' (Ca5), 21° 48' (Cd), 21° 48' (PVa2), 16° 42' (PVa5), na

presença de vegetação e de 21° 48' (Ca5), 16° 42' (Cd), 21°48 (PVa2), 11° 18 (Pva5), na ausência de vegetação, diminuindo sucessivamente conforme aumenta a declividade.

- Os solos que possuem baixa coesão e espessura superior a 1m, são os solos: Ca5, Cd, PVa2 e PaV5; e os solos que possuem alta coesão e espessura inferior ou igual a 1m, são os solos Ca1, Ca8 e Af.

A declividade crítica e o intervalo dos índices de segurança aos escorregamentos, para cada unidade de solos, podem ser verificados nas tabelas 58 a 61.

Tabela 58- Índice de segurança e declividade crítica para cada unidade de solos em encostas com vegetação/ sem horizonte C .

Unidade de solos	Intervalo dos índices de segurança	Declividade crítica
Af	> 62 a <15	não ocorrendo declividade crítica para esse tipo de solo
Ca1	> 18 a <3	não ocorrendo declividade crítica para esse tipo de solo
Ca3	> 6 a < 1	e a declividade crítica para esse tipo de solo é de 30° 57'
Ca5	> 11,5 a < 1,5	não ocorrendo declividade crítica para esse tipo de solo
Ca8	> 17,5 a < 3	não ocorrendo declividade crítica para esse tipo de solo
Cd	> 8 a < 1	e a declividade crítica para esse tipo de solo é de 30° 57'
PVa2	> 10 a < 1	e a declividade crítica para esse tipo de solo é de 30° 57'
PVa5	> 7 a < 1	e a declividade crítica para esse tipo de solo é de 30° 57'

Tabela 59- Índice de segurança e declividade crítica para cada unidade de solos em encostas sem vegetação/ sem horizonte C.

Unidade de solos	Intervalo dos índices de segurança	Declividade crítica
Af	> 231,5 a < 22	não ocorrendo declividade crítica para esse tipo de solo
Ca1	> 34 a < 3,5	não ocorrendo declividade crítica para esse tipo de solo
Ca3	> 6,5 a < 0,6	e a declividade crítica para esse tipo de solo é de 16° 42'
Ca5	> 14 a < 1	e a declividade crítica para esse tipo de solo é de 30° 57'
Ca8	> 32,5 a < 3	não ocorrendo declividade crítica para esse tipo de solo
Cd	> 9 a < 0,85	e a declividade crítica para esse tipo de solo é de 21° 48'
PVa2	> 12 a < 1	e a declividade crítica para esse tipo de solo é de 21° 48'
PVa5	> 8 a < 0,75	e a declividade crítica para esse tipo de solo é de 21° 48'

Tabela 60- Índice de segurança e declividade crítica para cada unidade de solos em encosta com vegetação/ com horizonte C.

Unidade de solos	Intervalo dos índices de segurança	Declividade crítica
Ca5	> 8,5 a < 1	e a declividade crítica para esse tipo de solo é de 30° 57'
Cd	> 6,5 a < 0,77	e a declividade crítica para esse tipo de solo é de 21° 48'
PVa2	> 7,7 a < 0,94	e a declividade crítica para esse tipo de solo é de 21° 48'
PVa5	> 5,5 a < 0,67	e a declividade crítica para esse tipo de solo é de 16° 42'

Tabela 61- Índice de segurança e declividade crítica para cada unidade de solos em encostas sem vegetação/ com horizonte C.

Unidade de solos	Intervalo dos índices de segurança	Declividade crítica
Ca5	> 9,4 a < 0,82	e a declividade crítica para esse tipo de solo é de 21° 48'
Cd	> 6,4 a < 0,5	e a declividade crítica para esse tipo de solo é de 16° 42'
Pva2	> 8,3 a < 0,74	e a declividade crítica para esse tipo de solo é de 21° 48''
Pva5	> 5,3 a < 0,48	e a declividade crítica para esse tipo de solo é de 11° 18'

Pelos dados obtidos acima, sugere-se que nos solos onde não ocorreu a declividade crítica, sejam feitos novos ensaios de fatores de segurança com declividades superiores a 30° 57', para averiguar em que grau encontra-se a declividade crítica.

## 2.2 Análise e Discussão do Mapa de Índices de Segurança das Encostas

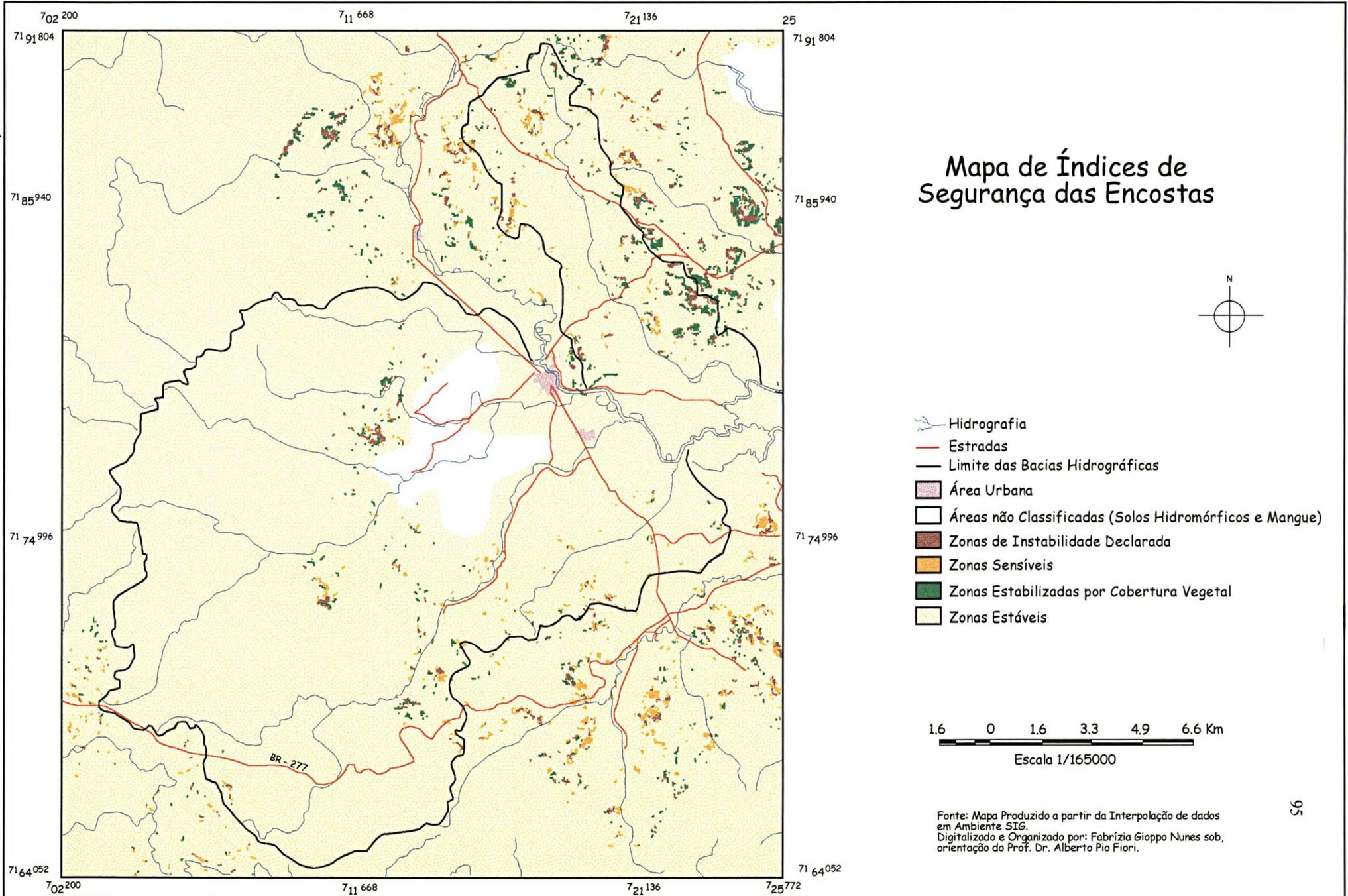
Durante o mapeamento dos índices de segurança das encostas, pode-se observar que a classe de zonas estabilizadas por cobertura vegetal, aparece predominantemente nas regiões de solos Podzólicos e de Cambissolos (Ca3 e Cd), juntamente com as áreas de altas declividades, que possuem elevada susceptibilidade a processos erosivos, tão logo é retirada a cobertura vegetal.

A classe de zonas de instabilidade declarada e a classe de zonas sensíveis, aparecem também, predominantemente sobre as áreas de solos Podzólicos e Cambissolos (Ca3 e Cd),

em altas declividades. Podendo estas duas classes, ocorrerem em áreas cobertas por vegetação de porte arbóreo ou não. Já a classe de zonas estáveis aparece com maior frequência nas áreas de Afloramento de rochas mais solos Litólicos e dos Cambissolos (Ca1 e Ca8), e nas áreas de baixa declividade, independente ou não, da cobertura vegetal de porte arbóreo.

O mapa a seguir mostra as áreas de risco aos escorregamentos, a partir dos índices de segurança das encostas, analisados em função do tipo de solo, da declividade e do efeito da cobertura vegetal de porte arbóreo (figura 47).

Figura 47 - Mapa de Índices de Segurança das Encostas



## Capítulo VI

### 1. Conclusão

As conclusões aqui apresentadas são divididas em três etapas. Primeiramente, é apresentada a conclusão da análise multitemporal do uso e ocupação do solo, posteriormente a conclusão dos dados obtidos pela aplicação da equação de FS e por último a conclusão da combinação das técnicas de SIG com a aplicação do modelo matemático, para a análise e mapeamento das áreas de riscos aos escorregamentos.

No que se refere à análise multitemporal do uso e ocupação do solo dos três anos estudados, verifica-se que esta análise permitiu acompanhar a tendência evolutiva do uso e ocupação do solo, durante um período de 46 anos.

Em 1953 cerca de 71,6% (202,6 km<sup>2</sup>) da área estudada era coberta pela vegetação de porte arbóreo enquanto que a vegetação de porte herbáceo e arbustivo representava apenas 24,8% (70,3 km<sup>2</sup>) da área. Em 1986 as áreas cobertas pela vegetação arbustiva praticamente não sofreram mudanças, passando a representar 71,5% (202,3 km<sup>2</sup>) de toda a superfície estudada. Um maior aumento desta classe ocorreu somente a partir de 1999, passando a possuir 78,8% (220,8 km<sup>2</sup>) da área estudada. Já as áreas ocupadas pela classe de herbácea e arbustiva, que era em 1986 de 25,3% (71,8 km<sup>2</sup>), diminuíram mais ainda em 1999, para 18% (51,1 km<sup>2</sup>).

Os dados da análise multitemporal evidenciam uma significativa regeneração da classe de vegetação arbórea, com a respectiva diminuição da classe de vegetação herbácea e arbustiva, principalmente entre o período de 1986 a 1999. Pode-se observar que as áreas que sofreram recuperação ou que se tornaram vegetação arbórea novamente em 1999, correspondiam às mesmas áreas, cobertas por vegetação herbácea e arbustiva nos anos de 1956 e 1986.

As áreas ocupadas pelas atividades agrícolas diminuíram apenas de 2,9% (8,3 km<sup>2</sup>) em 1956 para 2,2% (6,4 km<sup>2</sup>) em 1999, do total de toda a área estudada. As mudanças nesta classe são marcadas principalmente pelo abandono em parte de atividades agrícolas na região de serra, migrando essas, para a região de planície, e também pela mudança no tipo de cultivo

agrícola, que deixou de ser extensivo para ser praticado em áreas menores e mais dispersas uma das outras.

A identificação e mapeamento das cicatrizes de escorregamento, além de terem possibilitado a construção de perfis topográficos para a retroanálise, possibilitou também, verificar que as áreas de maior ocorrência de escorregamento situam-se sobre os solos de alta espessura com baixa coesão, nas regiões de vegetação herbácea e arbustiva, e nas áreas com cortes de estrada para a implantação da BR-277, geralmente associadas a uma alta declividade.

Com relação ao método de retroanálise desenvolvido por LOPES (1995), este representou um importante recurso para a obtenção dos valores de coesão ( $c$ ) e ângulo de atrito interno ( $\phi$ ), das diferentes unidades de solos mapeadas.

A avaliação dos índices de fatores de segurança das encostas, obtidos pela aplicação da equação de fatores de segurança, levando em consideração os efeitos da vegetação, as propriedades físicas e mecânicas do solo e a declividade, permitiu concluir que:

- O solo que apresenta a pior situação em termos de segurança a escorregamentos é o solo PVa5, em encostas sem vegetação considerando o horizonte C e o solo que apresenta a melhor situação em termos de segurança a escorregamentos é o solo Af, em encostas sem vegetação desconsiderando o horizonte C.
- Em solos de pouca espessura, geralmente associados a uma coesão elevada, como as unidades de solos Ca1, Ca8 e Af o papel que a vegetação de porte arbóreo desempenha para a estabilidade de taludes mostrou-se negativo, sendo os valores dos fatores de segurança menores com a vegetação do que sem a vegetação, em todos os ângulos de declividade estudados.
- Nas áreas de solos mais espessos, de menor coesão, como os solos Ca5, Cd, PVa2 e PVa5, a vegetação de porte arbóreo desempenha um papel positivo na estabilidade de taludes. Sendo o fator segurança ( $F_s$ ) maior com a vegetação do que sem a vegetação, mesmo nas altas declividades.
- Os solos de pouca profundidade e alta coesão possuem um fator de segurança bem mais alto que os solos mais evoluídos, de maior espessura e baixa coesão. O efeito da vegetação de porte arbóreo para o aumento do fator de segurança nos taludes da área estudada deu-se

em encostas que apresentam características de solos espessos, com baixa coesão, associadas ou não a uma alta declividade.

- À medida que as declividades aumentam o  $F_s$  de segurança diminui, independente da presença ou não da cobertura vegetal de porte arbóreo.

Durante a confecção do mapa de índice de segurança das encostas, as técnicas de SIG mostraram-se eficientes na interpolação dos mapas temáticos, como os dados de índices de segurança das encostas, adquiridos pela aplicação das equações de fatores de segurança.

O SIG utilizado, apresenta-se como uma excelente ferramenta para a análise de estabilidade de encostas a nível regional, pois possui, uma série de recursos para se trabalhar ao mesmo tempo com um vasto número de informações de uma forma mais rápida e mais precisa. Além de possibilitar a obtenção das informações quantitativas, dos diferentes índices de segurança das encostas, em forma de mapa, que mostra todas as áreas críticas aos escorregamentos.

## 2. Considerações Finais

A metodologia quantitativa na análise de estabilidade de encostas permitiu a quantificação dos riscos de escorregamentos levando em consideração os índices físicos e as propriedades mecânicas de cada unidade de solos, além de alguns fatores da vegetação que influenciam na estabilidade das encostas. Esta metodologia foi de grande importância para a confecção do mapa de índices de segurança das encostas, mostrando algumas características significativas da dinâmica ambiental da área estudada.

Quanto à cobertura vegetal, existe consenso generalizado entre diversos especialistas no assunto de que as florestas desempenham um importante papel na proteção do solo, e que a retirada da cobertura vegetal de porte arbóreo pode ocasionar não só o aparecimento de erosão, mas também de movimentos coletivos de massa. A aplicação da equação de fatores de segurança (FS) no decorrer deste trabalho revelou que este consenso não pode ser generalizado para toda a área das bacias em estudo, no que diz respeito à estabilidade de taludes.

O aparecimento de escorregamentos em uma determinada região não é devido somente à retirada da proteção vegetal, uma vez que podem ocorrer escorregamentos em áreas vegetadas, mas sim, pela combinação de diversas características do meio físico, onde a profundidade e a coesão do solo aparecem como fatores primordiais.

Um dos fatores que faz com que a vegetação de porte arbóreo desempenhe um papel negativo na estabilidade das encostas, da área estudada, pode ser atribuído à força que o vento exerce sobre as copas das árvores, aumentando as forças favoráveis ao movimento de massa. Em solos pouco espessos, as raízes das árvores não conseguem atingir profundidade suficiente para se fixar, sofrendo o impacto do vento que sopra na direção do declive da encosta, formando o efeito alavanca. Já nos solos mais espessos, as raízes conseguem atingir uma boa profundidade, se fixando melhor, tornando assim a força do vento pouco eminente.

Mas não se deve desconsiderar aqui o papel que a vegetação de porte arbóreo desempenha para a estabilidade de taludes, sendo em alguns casos, como já visto, de fundamental importância.

Nas áreas de zonas estabilizadas por cobertura vegetal, onde a vegetação desempenha um papel positivo, recomenda-se à preservação permanente da paisagem natural e, quando

esta for utilizada pelo homem, que sejam feitos monitoramentos com práticas conservacionistas para a implantação de agricultura e pastagem, além de obras de contenção, para os cortes de estradas.

Se houver um desmatamento nas áreas estabilizadas por cobertura vegetal, estas estarão propícia aos escorregamentos, sendo o fator de segurança menor que a unidade. Por isso, qualquer modificação da cobertura vegetal sem os devidos cuidados, implicará em movimentos coletivos de massa. Nas áreas de zonas de instabilidade declarada e zonas sensíveis, recomenda-se a preservação permanente dessas áreas sem a implantação de obras de engenharia ou atividades agrícolas. Quando estas atividades vierem a ocorrer, que sejam estão tomadas às devidas precauções.

O método de Lopes empregado foi de fundamental importância para a obtenção dos dados de coesão e ângulo de atrito interno, de cada unidade de solos. Durante a aplicação deste método, pode-se reconstituir através da confecção de perfis topográficos e equações matemáticas, as condições dos taludes que sofreram rupturas, uma vez que estas não puderam ser estimadas em campo ou laboratório, devido ao difícil acesso de algumas localidades da área de estudo e ao alto custo dos ensaios de laboratório. Recomenda-se aqui, se possível, que haja um estudo de retroanálise comparado com as análises de laboratório e campo, para aferir a exatidão dos dados de coesão e ângulo de atrito interno, da área estudada.

A metodologia quantitativa integrada ao Sistema de Informação Geográfica mostrou-se satisfatória para a análise de escorregamento em encostas, envolvendo ao mesmo tempo, a manipulação e interpolação de um grande número de informações com maior precisão. Estas duas metodologias integradas evitam as generalizações e interpretações subjetivas, além de permitir a espacialização geográfica dos dados com saídas em forma de mapas, e não apenas em forma de dados numéricos. Como exemplo, apresentam-se os dados dos índices de fatores de segurança, visualizando em mapa (figura 47), a localização espacial das áreas mais críticas aos escorregamentos, fornecendo assim, um novo produto de subsídio ao planejamento ambiental e urbano.

## Referências Bibliográficas

- AUGUSTO FILHO, O. “Escorregamentos em Encostas Naturais e Ocupadas: Análise e Controle”. In. BITAR, O. Y. “Curso de Geologia Aplicada ao Meio Ambiente”. São Paulo: ABGE & IPT/DIGEO, Série Meio Ambiente, p. 77 - 100, 1995.
- AUGUSTO FILHO, O. & VIRGILI, J. C. “Estabilidade de Taludes”. In. OLIVEIRA, A. M. S. dos & BRITO. S. A. “Geologia de Engenharia”. São Paulo: ABGE, p. 243- 269, 1998.
- BIGARELLA, J.J. “A Serra do Mar e a Porção Oriental do Estado do Paraná”. S.E. Planejamento do Estado do Paraná, Curitiba, 1978.
- BISHOP, D. M. & STEVENS, M. E. “Landdslide on Logged Areas in Southeast Alaska”. United States, Department of Agriculture, Forest Service, Northern Forest Experiment Station, Juneau, AK, Research Paper NOR -1, 1964.
- CAPUTO, H. P. “Mecânica dos Solos e suas Aplicações”. 6ª ed. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos, v.2, 1988.
- CORDANI, U. G. & GIRARDI, V. A. “Geologia da Folha de Morretes”. Boletim da Universidade Federal do Paraná, v.1, n.26, Curitiba, 1967.
- CHUVIECO, E. “Fundamentos de Teledeteccion Espacial”. Madrid, Rialp, S.A. 1990.
- CRÓSTA, A. P. “Processamento Digital de Imagens de Sensoriamento Remoto”. Campinas- SP. IG/UNICAMP, 1992.
- CUNHA, M. et al. “Manual de Ocupação de Encostas”. São Paulo: IPT, IPT Publicações, 1991.

EMBRAPA. **“Sistema Brasileiro de Classificação de Solos”**. Brasília, Embrapa Serviço de Produção de Informações – SPI, 1999.

EMBRAPA & IAPAR. **“Levantamento de Reconhecimento dos Solos do Estado do Paraná Tomo II”**. Convênio EMBRAPA/ SUDESUL/ Governo do Estado do Paraná/ IAPAR. Londrina, 1984.

FERNANDES. N. E & AMARAL, C. P. **“Movimentos de Massa: Uma Abordagem Geológica/ Geomorfológica”**. In. GUERRA, A. J. T. & CUNHA, S. B. **“Geomorfologia e Meio Ambiente”**. Rio de Janeiro, Bertrand Brasil, p. 123- 1994, 1996.

FIORI, A. P. **“Fatores que Influem na Análise de Vertentes e no Movimento de Massa em Encostas”**. Bol. Paranaense de Geociências, Editora da UFPR, n.43, p. 7-24, 1995<sup>a</sup>.

FIORI, A. P. **“Estudo da Estabilidade de Vertentes da Área de Guaraqueçaba, Paraná”**. Bol. Paranaense de Geociências, Editora da UFPR, n. 43, p. 25-39, 1995<sup>b</sup>.

FIORI, A. P & BORCHARDT, N. **“Influência da Vegetação na Estabilidade de Taludes Naturais”** . Bol. Paranaense de Geociências, Editora da UFPR, n. 45, p. 43-58, 1997.

FIORI, A. P.; SOARES, P. C.; MANTOVANI, L. E.; ASSINE, M. L. **“Geo- environmental Dynamics of Pantanal – Chaco: Multitemporal Study and Previsional Modelling”**. Departamento de Geologia/UFPR (projeto), 1995.

FIORI, A. P. & CARMIGNANI, L. **“Fundamentos de mecânica dos Solos e das Rochas: Aplicação na Estabilidade de Taludes”**. Curitiba/PR. Editora da UFPR, 2001.

FRENDRICH, R. & FERREIRA, M. A. **“Rosa de Frequência dos Ventos no Estado do Paraná”**. Revista Acadêmica da Puc/PR, 11, p. 49-57, 1995.

- GAIOTO, N. & QUEIROZ, R. C. da “Taludes Naturais em Solos”. In. CINTRA, J. C. A. & ALBIERO, J. H. “Solos do Interior de São Paulo”. São Paulo: ABMS/ USP-SC, p. 207-442, 1993.
- GUIDICINI, G. & NIEBLE, C. M. “Estabilidade de Taludes Naturais e de Escavação”. 2<sup>a</sup> ed. São Paulo, Edgard Blücher Ltda, 1983.
- HSI, G. & NATH, J. H. “Wind Drag Within a Simulated Forest”. Journal of Applied Meteorology. v. 9, p. 592 – 602, 1970.
- IBGE. “Manual Técnico da Vegetação Brasileira”. Manual Técnico em Geociências. v.1, Rio de Janeiro: IBGE, 1992.
- INPE. “Programa Spring versão 3.4”. Tutorial, São José dos Campos/SP, 2000, CD ROM.
- IPARDES. “Zoneamento do Litoral Paranaense”. Convênio SEPL/ IPARDES. Curitiba, 1989.
- KERTZMAN, F. F. & DINIZ, N. C. “As Abordagens de Solos Utilizadas na Geologia Aplicada ao Meio Ambiente”. In. BITAR, O. Y. “Curso de Geologia Aplicada ao Meio Ambiente”. São Paulo: ABGE & IPT/DIGEO, Série Meio Ambiente, p. 19 a 29, 1995.
- KOZCIAK, S. “Evolução do Processo Erosivo das Bacias dos Rios Arica- Açú e Arica-Mirim – MT, Através de Análise Multitemporal”. Dissertação de Mestrado. Curso de Pós Graduação em Geologia do Setor de Ciências da Terra da UFPR, 2000.
- LOPES, J. A.U. “Os Movimentos Coletivos dos Solos e a Evolução das Encostas Naturais nas Regiões Tropicais e Subtropicais Úmidas”. Dissertação de Mestrado. Curso de Pós Graduação em Geologia do Setor de Tecnologia da UFPR, Curitiba, 1995.
- MAACK, R. “Geografia Física do Estado do Paraná”. Curitiba, UFPR. 1968.

MARCHIORO, N.P.X. “A Sustentabilidade dos Sistemas Agrários no Litoral do Paraná: O Caso de Morretes”. Tese de Doutorado. Curso de Pós Graduação em Meio Ambiente do Setor de Ciências Agrárias da UFPR, 1999.

NOVO, E. M. L. M. “Sensoriamento Remoto – Princípios e Aplicações”. 2<sup>a</sup> ed. São Paulo, Edgard Blücher Ltda, 1992.

OKA-FIORI, C. & CANALI, N.E. “Análise Geomorfológica da Área do Parque do Marumbi – Serra do Mar (PR)”. Atas do II Simpósio Sul Brasileiro de Geologia, Curitiba, v.1, p. 41- 58, 1987.

PARANHOS FILHO, A. C. “Análise Geo-ambiental Multitemporal: O Estudo de caso da Região de Coxim e da Bacia do Taquirzinho- MS/Brasil”. Tese de Doutorado. Curso de Pós Graduação em Geologia do Setor de Ciências da Terra da UFPR, 2000.

PINTO, C. S. de; GOBARA, W.; PERES, J. J. & NADER, J.J. “Propriedade dos Solos Residuais”. In. CINTRA, J. C. A. & ALBIERO, J. H. “Solos do Interior de São Paulo”. São Paulo: ABMS/ USP-SC, p. 94 – 142, 1993.

RAMALHO, G. G.; CALIJURI, M. L. & RIOS, L. “Proposta Metodológica para a Elaboração de Mapeamento Geotécnico de Viçosa (Viçosa/ MS): com Uso de Sistema de Informação Geográfica”. Anais do Gis Brasil 94, Curitiba/ PR, 1994.

ROCHA, C. H. B. “Geoprocessamento Tecnologia Transdisciplinar”. Juiz de Fora/ MG, Editora do Autor, 2000.

RODRIGUES, B.B; PEJON, O. J. & ZUQUETTE, L. V. “ Metodologias para Elaboração de Cartas de Riscos Decorrentes de Movimentos de Massa Gravitacionais: Análise Críticas”. Revista de Geociências, São Paulo, 16(2), p.525- 564, 1997.

**WOLLE, C. M. & PEDROSA, J. A . B. “Horizonte de Transição Condicionam Mecanismos de Instabilização de Encostas na Serra do Mar”. Anais do Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, Itapema: ABGE, v.2, p. 121-135, 1981.**

**WU, T.H.; Mc KINNELL, W. P. III & SWANSTON, D. N. “Strength of Tree Roots and Landslides on Princes of Wales Island Alaska”. Canadian Geotechnical Journal, n.16, p. 19 - 33, 1979.**

## Anexo 01 – Programa de Linguagem Espacial para Geoprocessamento Algebrico Utilizado na Integração dos Dados

```
//
//Programa para determinar IS de taludes,
//Dados os mapas de solo, declivi e uso do solo
//

{
//Declaracao das variaveis temáticas
Tematico solo ( "Solos" ), decliv ( "hipsometria" ), uso ( "uso-solo" ),
IS ( "IS-Taludes" );

//Instanciações das variáveis temáticas
solo = Recupere (Nome="Cart-solo");
decliv = Recupere (Nome="cart-decliv-1");
uso = Recupere (Nome="tmsup-bata-T");

IS = Novo (Nome="Cart-IS-Taludes",
          ResX=10 , ResY=10 , Escala = 50000 );

IS = Atribua (CategoriaFim="IS-Taludes")
{
"Estavel": solo.Classe == "Af" && decliv.Classe == "< 5%" && uso.Classe == "VA" ||
(solo.Classe == "Af" && decliv.Classe == "5% - 10%" && uso.Classe == "VA" ) ||
(solo.Classe == "Af" && decliv.Classe == "10% - 15%" && uso.Classe == "VA" ) ||
(solo.Classe == "Af" && decliv.Classe == "15% - 20%" && uso.Classe == "VA" ) ||
(solo.Classe == "Af" && decliv.Classe == "20% - 30%" && uso.Classe == "VA" ) ||
(solo.Classe == "Af" && decliv.Classe == "30% - 40%" && uso.Classe == "VA" ) ||
(solo.Classe == "Af" && decliv.Classe == "40% - 60%" && uso.Classe == "VA" ) ||
(solo.Classe == "Af" && decliv.Classe == "> 60%" && uso.Classe == "VA" ) ||
(solo.Classe == "Af" && decliv.Classe == "< 5%" && uso.Classe == "R" ) ||
(solo.Classe == "Af" && decliv.Classe == "5% - 10%" && uso.Classe == "R" ) ||
(solo.Classe == "Af" && decliv.Classe == "10% - 15%" && uso.Classe == "R" ) ||
(solo.Classe == "Af" && decliv.Classe == "15% - 20%" && uso.Classe == "R" ) ||
(solo.Classe == "Af" && decliv.Classe == "20% - 30%" && uso.Classe == "R" ) ||
(solo.Classe == "Af" && decliv.Classe == "30% - 40%" && uso.Classe == "R" ) ||
(solo.Classe == "Af" && decliv.Classe == "40% - 60%" && uso.Classe == "R" ) ||
(solo.Classe == "Af" && decliv.Classe == "> 60%" && uso.Classe == "R" ) ||
(solo.Classe == "Af" && decliv.Classe == "< 5%" && uso.Classe == "HA" ) ||
(solo.Classe == "Af" && decliv.Classe == "5% - 10%" && uso.Classe == "HA" ) ||
(solo.Classe == "Af" && decliv.Classe == "10% - 15%" && uso.Classe == "HA" ) ||
(solo.Classe == "Af" && decliv.Classe == "15% - 20%" && uso.Classe == "HA" ) ||
(solo.Classe == "Af" && decliv.Classe == "20% - 30%" && uso.Classe == "HA" ) ||
(solo.Classe == "Af" && decliv.Classe == "30% - 40%" && uso.Classe == "HA" ) ||
(solo.Classe == "Af" && decliv.Classe == "40% - 60%" && uso.Classe == "HA" ) ||
(solo.Classe == "Af" && decliv.Classe == "> 60%" && uso.Classe == "HA" ) ||
(solo.Classe == "Af" && decliv.Classe == "< 5%" && uso.Classe == "AG" ) ||
(solo.Classe == "Af" && decliv.Classe == "5% - 10%" && uso.Classe == "AG" ) ||
(solo.Classe == "Af" && decliv.Classe == "10% - 15%" && uso.Classe == "AG" ) ||
(solo.Classe == "Af" && decliv.Classe == "15% - 20%" && uso.Classe == "AG" ) ||
(solo.Classe == "Af" && decliv.Classe == "20% - 30%" && uso.Classe == "AG" ) ||
(solo.Classe == "Af" && decliv.Classe == "30% - 40%" && uso.Classe == "AG" ) ||
(solo.Classe == "Af" && decliv.Classe == "40% - 60%" && uso.Classe == "AG" ) ||
(solo.Classe == "Af" && decliv.Classe == "> 60%" && uso.Classe == "AG" ) ||
(solo.Classe == "Af" && decliv.Classe == "< 5%" && uso.Classe == "CA" ) ||
(solo.Classe == "Af" && decliv.Classe == "5% - 10%" && uso.Classe == "CA" ) ||
(solo.Classe == "Af" && decliv.Classe == "10% - 15%" && uso.Classe == "CA" ) ||

```









```

( solo. Classe == "PVa5" && decliv. Classe == "20% - 30%" && uso. Classe == "AG" ) ||
( solo. Classe == "PVa5" && decliv. Classe == "30% - 40%" && uso. Classe == "AG" ) ||
( solo. Classe == "PVa5" && decliv. Classe == "40% - 60%" && uso. Classe == "AG" ) ||
( solo. Classe == "PVa5" && decliv. Classe == "> 60%" && uso. Classe == "AG" ) ||
( solo. Classe == "PVa5" && decliv. Classe == "20% - 30%" && uso. Classe == "CA" ) ||
( solo. Classe == "PVa5" && decliv. Classe == "30% - 40%" && uso. Classe == "CA" ) ||
( solo. Classe == "PVa5" && decliv. Classe == "40% - 60%" && uso. Classe == "CA" ) ||
( solo. Classe == "PVa5" && decliv. Classe == "> 60%" && uso. Classe == "CA" ) ||
( solo. Classe == "PVa5" && decliv. Classe == "20% - 30%" && uso. Classe == "M" ) ||
( solo. Classe == "PVa5" && decliv. Classe == "30% - 40%" && uso. Classe == "M" ) ||
( solo. Classe == "PVa5" && decliv. Classe == "40% - 60%" && uso. Classe == "M" ) ||
( solo. Classe == "PVa5" && decliv. Classe == "> 60%" && uso. Classe == "M" ),

```

"NC" : Outros

```

};
}

```

Onde:

IS = Índice de segurança

VA = Vegetação de porte arbóreo

HA = Vegetação de porte herbáceo e arbustivo

RF = Reflorestamento

AG = Agricultura

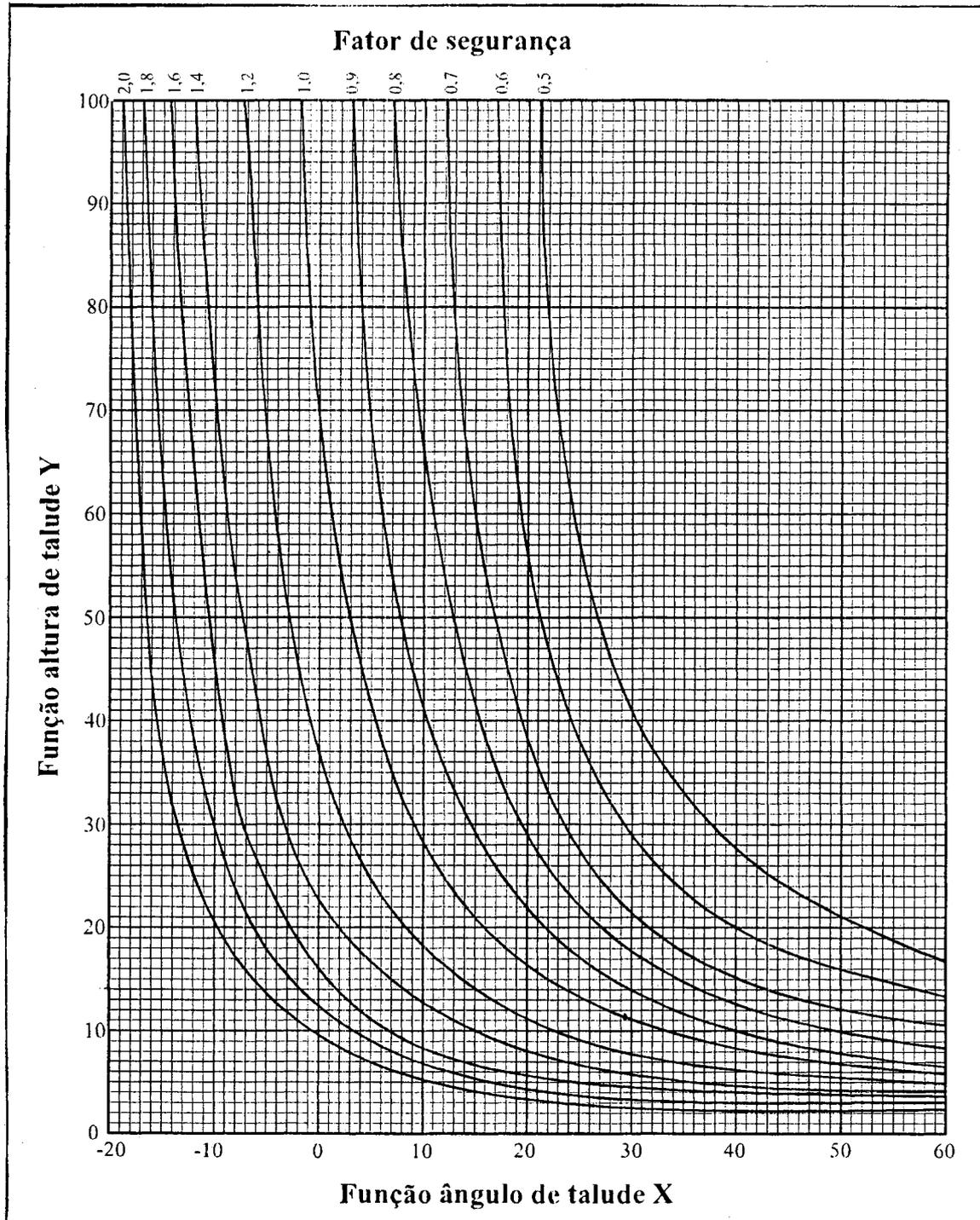
AR = Área urbana

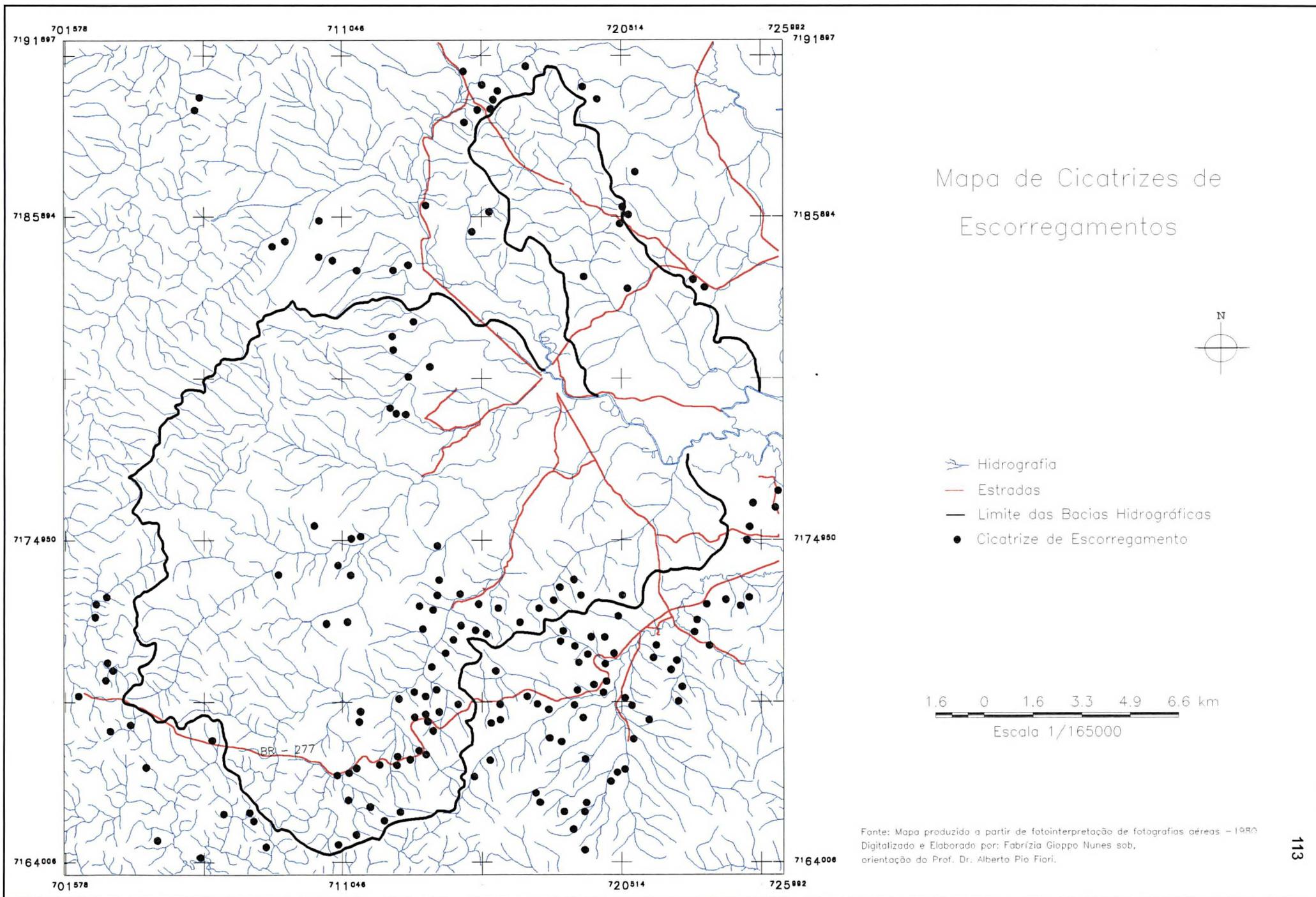
AC = Corpo d'água

R = Rochoso

M = Mangue

Anexo 02: figura 48 - Ábaco de Ruptura Circular de HOEK (1970)





#### **Anexo 04: Fotografias de Cicatrizes de Escorregamentos da Área de Estudo**

**Figura 50 – fotografia de cicatriz de escorregamento antiga devido ao corte da estrada (BR-277 km 48). Pode-se observar a retomada da cobertura vegetal na encosta.**

**Figura 51 – fotografia de cicatriz de escorregamento recente devido ao corte da estrada (BR-277 Km 47).**

**Figura 52 – fotografia de cicatriz de escorregamento recente devido ao corte da estrada (BR-277 km 46).**

**Figura 53 - fotografia de cicatrizes naturais na Serra do Marumbi por processo de escorregamento gravitacional. Pode-se observar a presença de vegetação de porte arbóreo sobre as encostas.**

**Figura 54 – fotografia de cicatrizes de escorregamentos com obras de contenção ao longo da estrada (BR-277 km 41).**

**Figura 55 – fotografia do Zoom da cicatriz de escorregamento da figura 54. Pode-se observar obras de contenção sobre a encosta, devido ao escorregamento provocado pelo corte da estrada (BR –277 km 41).**



Figura 50 – Cicatriz de escorregamento antiga devido ao corte da estrada (BR-277 km 48). Pode-se observar a retomada da cobertura vegetal na encosta. Foto do Autor 2002.

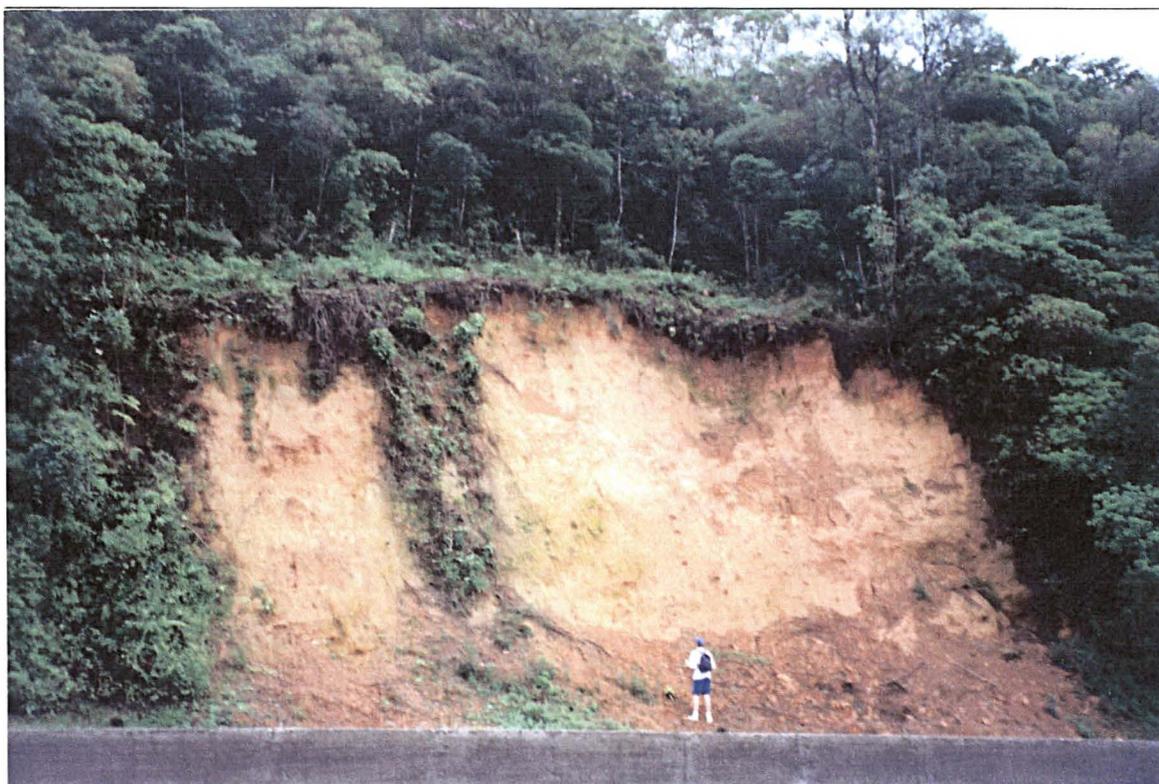


Figura 51 – Cicatriz de escorregamento recente devido ao corte da estrada (BR-277 Km 47). Foto do Autor 2002.



Figura 52 – Cicatriz de escorregamento recente devido ao corte da estrada (BR-277 km 46). Foto do Autor 2002.



Figura 53 - Cicatrizes naturais na Serra do Marumbi por processo de escorregamento gravitacional. Pode-se observar a presença de vegetação de porte arbóreo sobre as encostas . Foto do Autor 1999.



Figura 54 – Cicatrizes de escorregamentos com obras de contenção ao longo da estrada (BR-277 km 41). Foto do Autor 2002.



Figura 55 – Zoom da cicatriz de escorregamento da figura 54. Pode-se observar obras de contenção sobre a encosta, devido ao escorregamento provocado pelo corte da estrada (BR –277 km 41). Foto do Autor 2002.